

基于 $\delta^{13}\text{C}$ 值的黄土高原生态林和经济林水分利用效率差异及对环境响应分析

杨树焯^{1,2}, 赵西宁^{1,2,3}, 高晓东^{1,2,3}, 于流洋^{1,2}

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:为探明黄土高原典型人工生态林(刺槐)和人工经济林(苹果)叶片水分利用效率(WUE)对环境因子的响应及在气候分区中之间的差异。以黄土高原22个样点的叶片样本为例,基于稳定碳同位素技术可以反映植物长期WUE的特点,测定其成熟叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值,分析其与黄土高原年均降水量、温度、日照时间、水汽压和相对湿度的关系及在不同气候分区的差异。结果表明:(1)因存在人为管理措施,苹果叶片平均WUE显著大于刺槐叶片平均WUE,分别为4.29,3.83 mmol CO₂/mol H₂O;(2)在气候分区中,同一植物半干旱区的叶片WUE高于半湿润区的叶片WUE,其中半干旱区苹果叶片WUE比半湿润区苹果叶片WUE提高12.5%,半干旱区刺槐叶片平均WUE比半湿润区刺槐叶片WUE提高6.4%;(3)苹果和刺槐叶片WUE与环境因子的响应一致,叶片WUE的变化对年平均水汽压的响应更明显。研究结果对黄土高原WUE的研究进行了扩充,为该地区提升水分利用效率提供了理论指导。

关键词: 稳定碳同位素; 水分利用效率; 生态林; 经济林

中图分类号:S727 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2022)04-0247-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.04.031

Difference of Water Use Efficiency Between Ecological and Economic Forest and Its Response to Environment Using Carbon Isotope in the Loess Plateau of China

YANG Shuyue^{1,2}, ZHAO Xining^{1,2,3}, GAO Xiaodong^{1,2,3}, YU Liuyang^{1,2}

(1.Ministry of Education Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and

Semiarid Areas, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.College of Water

Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

3.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to explore the response of foliar water use efficiency (WUE) of typical artificial ecological forest (*Robinia pseudoacacia*) and artificial economic forest (Apple) to environmental factors and the difference in different climate zones in the Loess Plateau, leaf samples from 22 samples were taken as research subject in the Loess Plateau. The stable carbon isotope technique was used, which could reflect the long-term WUE of plants. We measured the $\delta^{13}\text{C}$ value of mature leaves of plants, analyzed its response to annual precipitation, temperature, solar radiation, relative humidity and water vapor pressure, and examined the difference between artificial ecological forest and economic forest in different climate zones. The results showed that: (1) The foliar WUE of apple was significantly higher than that of *Robinia pseudoacacia*, the values were 4.29 mmol CO₂/mol H₂O and 3.83 mmol CO₂/mol H₂O respectively. (2) The foliar WUE of the same plant in semi-arid area was higher than that in semi-humid area in climate regionalization. The foliar WUE of apple in semi-arid area was 12.5% higher than that in semi-humid area. The foliar WUE of *Robinia pseudoacacia* in semi-arid area was 6.4% higher than that in semi-humid area. (3) The foliar WUE of apple and *Robinia pseudoacacia* had the same response to environmental factors, and the response of foliar WUE to average water vapor pressure was more sensitive than other factors. The results expand the study of WUE and

收稿日期:2021-11-24

资助项目:陕西省杰出青年科学基金项目(2021JC-19);唐仲英基金项目;国家自然科学基金项目(42125705)

第一作者:杨树焯(1996—),男,硕士研究生,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: ysyleaves@163.com

通信作者:赵西宁(1976—),男,研究员,主要从事农业水土资源调控与利用研究。E-mail: zxn@nwafu.edu.cn

provide theoretical guidance for the improvement of WUE in the Loess Plateau.

Keywords: stable carbon isotope; water use efficiency; ecological forest; economic forests

我国于 1999 年启动退耕还林(草)工程,自工程启动以来,黄土高原地区的生态环境得到很大的修复,植被覆盖率明显上升。其中乔木林以经济林苹果和生态林刺槐较为明显。苹果因黄土高原具有得天独厚的自然环境优势,如昼夜温差较大、光热资源丰富等,被认为是最适合种植生长的地区之一,如今已经成为当地农村的主要经济来源^[1]。此外,刺槐因其速生、耐旱、易繁殖,并兼具良好的生态效益和经济效益等特点被用作黄土高原地区主要的水土保持树种和造林树种^[2],是黄土高原乔木林种植面积最大的树种之一,在防治该区水土流失工作方面发挥着关键的作用。随着这 2 种植被覆盖率的快速增加,新的生态问题日趋凸显,如土壤干化、植被退化等^[3],并且在全球气候变暖的大背景下,随着温度的升高,水资源消耗量不断增加^[4],加之黄土高原地下水储量既少又深,且降水补给不足,黄土高原的退耕林植被普遍出现生物产量高、生态用水大、土壤干化严重的现象^[5]。水分逐渐限制黄土高原植物生长,影响退耕还林(草)工程的可持续发展。为了进一步完成植被恢复可持续性的评估及预测,研究区域水碳耦合关系及对环境的响应具有重要意义。

水分利用效率(water use efficiency, WUE)是生态系统碳水循环间相互耦合关系的重要指标^[6],能够反映生态系统对水资源变化的响应^[4],对揭示大气—叶片碳水循环过程中相互作用及植物生存适应对策有极其重要意义^[7],高 WUE 是协调植被生长与耗水矛盾的重要途径^[8]。关于 WUE 的研究包括叶片、植株、群体等多个尺度,而叶片尺度是更大尺度的研究基础。有研究^[9]表明,稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)是有效反映植物 WUE 的途径之一,与其他手段不同的是,其可以指示植物有机质形成期内的长期平均 WUE,反映植物在一段时间内对水分的利用以及水分胁迫的适应状况。近年来,对于 WUE 的研究大多都基于单点试验或利用模型模拟区域尺度 WUE,缺少在区域多点取样的试验观测结果。

本研究选取黄土高原半干旱区以及半湿润区的苹果园和刺槐林,通过野外取样,利用稳定碳同位素测量不同地点植物叶片 WUE,分析其对环境因子(年均降水量、温度、日照时间、水汽压和相对湿度)的响应及在气候分区中人工生态林和经济林之间的差异,能够为认识中国黄土高原地区 WUE 及其对气候变化的响应提供参考,为该地区提高 WUE、乔木林管理的精细化、科学化以及可持续发展提供决策建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于中国黄河流域中部($100^{\circ}54'—114^{\circ}33'E$, $33^{\circ}43'—41^{\circ}16'N$),具有典型的大陆季风气候特征。年平均气温约为 $3.6\sim 14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均日照时间 $2\ 000\sim 3\ 100\text{ h}$,年平均降水量 $150\sim 800\text{ mm}$,西北低,东南高,多集中在 7—9 月,年际和季节分配不均。该区的土壤主要为风成黄土,且地下水资源丰富,但存在分布不均、泥沙多、枯水期长和年内年际变化大等问题^[10]。随着退耕还林工程以来,分别以刺槐和苹果为主的生态林和经济林得到大规模的种植,刺槐在黄土高原各个地区均有成片种植,种植面积达 0.1 亿 hm^2 ^[10],而 2019 年黄土高原地区苹果园面积占全国苹果园面积的 59.71% ,其中陕西的苹果果园面积最大且逐年增加,甘肃、河南和山西次之^[11]。现基于平均年降水量与潜在蒸散(P/ET)的比例,将黄土高原划分为 3 个气候区域:干旱区($0.05\sim 0.2$),半干旱区($0.2\sim 0.5$)和半湿润区($0.5\sim 0.65$)^[12]。采样点所属气候分区按表 1 降雨信息分类。

1.2 采样点环境要素的收集

1955—2018 年的气象数据集,包括年均降水量、温度、年日照时间、水汽压和相对湿度均来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),使用 ArcMap 10.6 进行反距离权重插值获得黄土高原取样点气象数据。

1.3 野外考察、样品采集及碳同位素测定

本研究以黄土高原区域中经济林雨养富士苹果和生态林刺槐叶片为研究对象,树龄均约 15 年。在 2020 年 7 月共设置 22 个取样点进行取样,取样的同一树种长势相近,各采样点选取 3 棵树作为重复,避免人为干扰及其他非气候因素对试验结果的影响。

叶片的取样:在树的东南西北 4 个方向分别采取 4 片生长良好的叶片(包括阳面和阴面),将所取叶片置于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中杀青 30 min,然后 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干 8 h,用研钵和研杵磨碎,过 1 mm 的筛网,处理过程中注意碳源污染。 $\delta^{13}\text{C}$ 值在西北农林科技大学旱区节水农业研究院实验楼进行测定。

主要测试过程为:用百万分之一电子天平称取 1 mg 处理好的样品,密封于锡杯内;将装有样品的锡杯放入 Costech ECS 4024 CN 元素分析仪,经高温燃烧生成 CO_2 ,纯化后再导入 Picarro G2131-i CO_2 同位素分析仪检测样品燃烧后生成 CO_2 的 ^{13}C 与 ^{12}C 比率,并与国际标准物(Pee Dee Belnite 或 PDB)比对后计算出各样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)测量精度为 $<0.1\%$ 。

表 1 采样点信息

气候分区	采样点	经度/(°)	纬度/(°)	降水量/mm	温度/°C	日照时间/h	相对湿度/%	水汽压/hPa
半干旱区	子洲	110.03	37.45	454	9.79	2626.02	56.50	8.29
	正宁	108.75	37.17	444	9.00	2587.38	59.29	8.00
	子长	109.55	37.27	454	9.75	2628.71	56.53	8.27
	神木	110.25	38.72	422	8.09	2765.24	54.02	7.29
	延安	109.33	36.68	528	10.00	2499.74	62.16	8.93
	米脂	110.18	37.87	411	8.50	2777.53	54.70	7.52
	吉县	110.57	36.07	529	11.47	2390.49	64.15	8.98
	隰县	111.00	36.57	518	9.60	2564.52	57.27	8.35
	庄浪	105.88	35.08	495	8.70	2229.86	64.77	8.58
	静宁	106.08	35.00	515	9.15	2186.43	65.19	8.89
	陇南	105.48	34.27	535	10.20	2020.00	67.20	9.60
	天水	105.57	34.55	536	10.33	2008.20	67.15	9.72
	新景	105.62	35.15	466	7.43	2318.06	64.88	7.87
	长武	107.68	35.20	580	9.54	2137.95	67.74	9.48
半湿润区	铜川	108.58	35.58	572	11.10	2253.33	69.14	10.21
	扶风	107.88	34.52	622	12.50	1958.52	68.47	11.48
	灵宝	110.35	34.73	696	14.50	2205.40	64.46	9.29
	白水	109.23	34.97	581	11.60	2223.99	65.44	10.33
	临猗	110.75	35.20	553	13.10	2218.44	62.86	11.05
	平陆	111.12	34.83	552	13.93	2218.52	61.21	11.46
	宝鸡	107.18	34.63	672	12.84	1884.98	67.36	11.31
	万荣	110.72	35.37	565	12.58	2258.60	64.03	10.76

1.4 水分利用效率计算

水分利用效率与大气 CO_2 浓度 (C_a) 和植物叶胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的数量关系为^[13]:

$$\text{WUE} = (C_a - C_i) / 1.6\Delta W \quad (1)$$

式中: C_a 为大气 CO_2 浓度; C_i 为植物叶胞间 CO_2 浓度; 1.6 为气孔对水蒸气的传导性转为对 CO_2 传导性的转换因子; ΔW 为叶片与空气的水蒸气浓度梯度。

同时, Farquhar 等^[14] 还进一步建立碳同位素分辨率 ($\Delta^{13}\text{C}$) 与 C_i 之间的数量关系方程:

$$\Delta^{13}\text{C} = a + (b - a) (C_i / C_a) \quad (2)$$

$$\Delta = (\delta^{13}\text{C}_a - \delta^{13}\text{C}_p) / (1 + \delta^{13}\text{C}_p) \quad (3)$$

式中: $\delta^{13}\text{C}_p$ 和 $\delta^{13}\text{C}_a$ 分别为植物及大气的 CO_2 碳同位素比率, 北半球的 $\delta^{13}\text{C}_a = -6.7\text{‰}$; $a = 4.4\text{‰}$, 代表 CO_2 通过气孔时扩散分馏; $b = 27\text{‰}$, 指 CO_2 被 Rubisco 羧化过程中的分馏。

因为 $\delta^{13}\text{C}$ 值可间接揭示植物长时期的水分利用效率, 水分利用效率可以用公式(4)计算:

$$\text{WUE} = C_a \{1 - [(\delta^{13}\text{C}_a - \delta^{13}\text{C}_p) / a(b - a)]\} / 1.6\Delta W \quad (4)$$

式中: $\delta^{13}\text{C}_a$ 的平均浓度为 $321 \mu\text{L/L}$; ΔW 为 12 MPa/Pa ^[15], 所以

$$\text{WUE} = 13.712 + 0.354\delta^{13}\text{C} \quad (5)$$

1.5 数据分析

采用 Excel 2016 (Microsoft, Redmond, USA)、

SPSS 24.0 (SPSS, Chicago, USA) 和 Canoco5 软件对数据进行统计分析, 采用单因素方差分析 (ANOVA) 和多重比较 LSD 方法分析不同处理之间的差异。采用 Origin 2016 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 黄土高原苹果和刺槐叶片碳同位素 (WUE) 组成

将采集的黄土高原苹果和刺槐样品分别进行汇总 (表 2), WUE 受种间差异影响较大, 苹果和刺槐的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值分别为 $(-26.61 \pm 1.16)\text{‰}$ 和 $(-27.93 \pm 1.76)\text{‰}$, 苹果叶片平均 WUE 大于刺槐叶片平均 WUE, 分别为 $4.29, 3.83 \text{ mmol CO}_2 / \text{mol H}_2\text{O}$, 苹果和刺槐的最大值分别为 $5.12, 5.21 \text{ mmol CO}_2 / \text{mol H}_2\text{O}$, 最小值分别为 $3.35, 2.27 \text{ mmol CO}_2 / \text{mol H}_2\text{O}$, 苹果和刺槐叶片 WUE 的最大值相似, 但是刺槐叶片 WUE 最小值显著小于苹果叶片 WUE, 2 种植物的差异均达到显著水平 ($p < 0.05$)。刺槐叶片 WUE 的变化幅度大于苹果, 最小值比苹果叶片 WUE 低 32.2% 。

从图 1 可以看出, 苹果和刺槐植物叶片 WUE 的频率分布也有显著差异, 95% 的刺槐叶片 WUE 分布在 $3.00 \sim 4.66 \text{ mmol CO}_2 / \text{mol H}_2\text{O}$, 95% 的苹果叶片 WUE 分布在 $3.22 \sim 5.36 \text{ mmol CO}_2 / \text{mol H}_2\text{O}$, 刺槐叶片 WUE 值的分布整体较苹果叶片 WUE 值更低。

表 2 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ (WUE)统计特征

品种	$\delta^{13}\text{C}$ 平均值/ ‰	WUE 平均值/ ($\text{mmol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$)	最大值 $\delta^{13}\text{C}$ (WUE)/ ‰	最小值 $\delta^{13}\text{C}$ (WUE)/ ‰
苹果	-26.61 ± 1.16	4.29	$-24.27(5.12)$	$-29.27(3.35)$
刺槐	-27.93 ± 1.76	3.83	$-24.02(5.21)$	$-32.33(2.27)$

注:表中后 2 列括号中为 $\delta^{13}\text{C}$ 对应的 WUE 值。

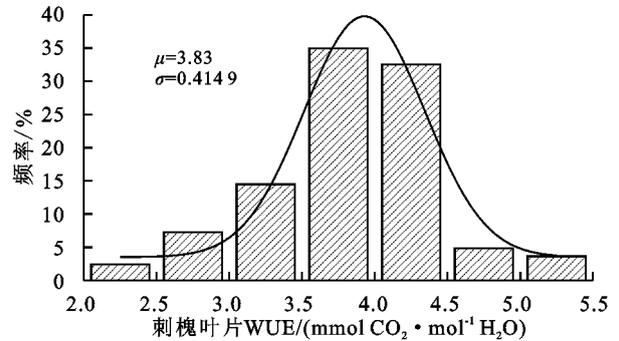
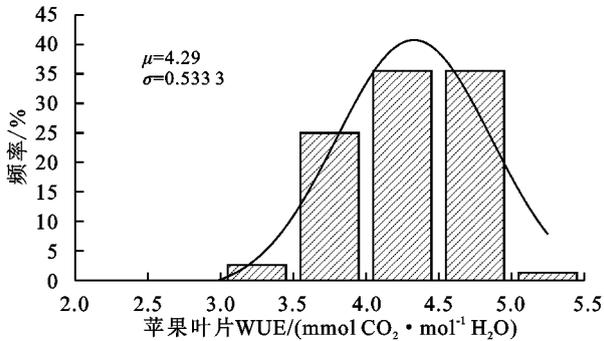
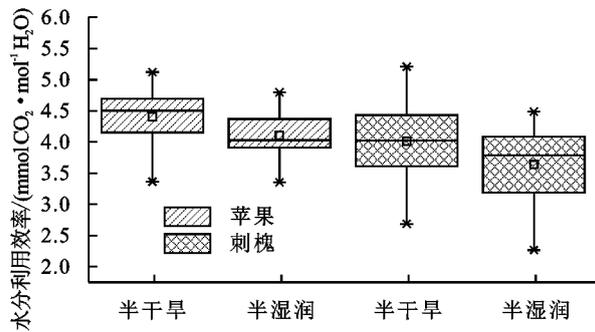


图 1 叶片 WUE 组成频率直方图

2.2 黄土高原苹果和刺槐叶片 WUE 气候分区差异

同一种植物叶片 WUE 在气候分区间差异显著 ($p < 0.05$) (图 2), 位于半干旱地区的叶片 WUE 高于半湿润地区的叶片 WUE。其中半干旱区苹果叶片 WUE 比半湿润区苹果叶片 WUE 高 12.5%, 半干旱区刺槐叶片 WUE 比半湿润区刺槐叶片 WUE 高 6.4%。而在同一气候区, 则呈现出苹果叶片 WUE 显著高于刺槐叶片 WUE 的特点。



注: * 表示数据的最大值和最小值; 箱型从上到下三线分别表示上四分位数、中位数和下四分位数。

图 2 黄土高原气候分区叶片 WUE 差异

2.3 苹果和刺槐叶片 WUE 与环境因子的关系

苹果和刺槐叶片 WUE 与环境因子的关系见图 3。其中苹果和刺槐叶片 WUE 与环境因子的响应一致, 与年均降水量 ($R_1^2 = 0.162, p_1 < 0.001, R_2^2 = 0.134, p_2 < 0.001$)、温度 ($R_1^2 = 0.226, p_1 < 0.001, R_2^2 = 0.092, p_2 < 0.05$)、相对湿度 ($R_1^2 = 0.222, p_1 < 0.001, R_2^2 = 0.164, p_2 < 0.001$) 和水汽压 ($R_1^2 = 0.296, p_1 < 0.001, R_2^2 = 0.059, p_2 < 0.05$) 均呈高度负相关, 与年均日照时间 ($R_1^2 = 0.313, p_1 < 0.001, R_2^2 = 0.099, p_2 < 0.05$) 呈高度正相关, 即 WUE 随年均降水量、温度、相对湿度和水汽压的增加而减小, 随年均日照时间的增加而增加。苹果和刺槐叶片 WUE 对各环境因子

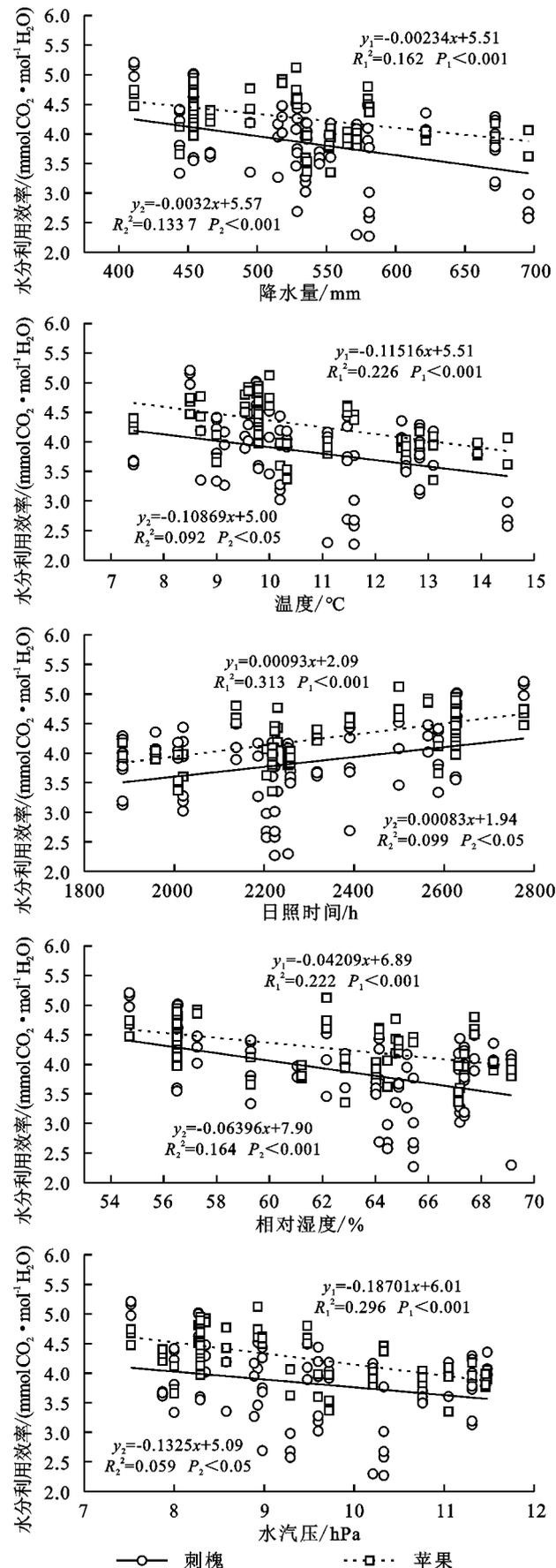
的响应相关程度不同, 刺槐和苹果对平均水汽压的响应最为明显 (图 3)。

3 讨论

3.1 黄土高原苹果和刺槐叶片碳同位素 (WUE) 组成

基于大量数据表明, C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-20\text{‰} \sim -35\text{‰}$, 平均为 -27‰ [16], 在 Wang 等 [17] 对中国北方地区的 461 种 C_3 植物的研究中也说明, 这一平均值为 -27.1‰ 。本研究在黄土高原采集的苹果和刺槐样品中, $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-24.02\text{‰} \sim -32.33\text{‰}$, 平均值为 -27.26‰ , 符合前人的研究。从表 2 可知, 苹果 $\delta^{13}\text{C}$ 均值高于刺槐 $\delta^{13}\text{C}$ 均值, 造成这一现象除种间差异外还与人为管理有关。其中有机肥和无机肥的合理使用可以提高 WUE。施加氮 (N)、钾 (K) 肥可以提高叶肉羧化能力, 减少水分的无效消耗, 增强光合能力, 从而提高叶片 WUE。已有研究 [18-19] 表明, 土壤缺水或无灌溉条件的果园, 可以通过增施氮 (N)、钾 (K) 肥来提高叶片 WUE, 起到以肥补水的作用。土壤中适量施用氮 (N)、磷 (P)、钾 (K) 肥有利于提高苹果叶片的 WUE [20]。向苹果树喷洒甜菜碱等有机分子物质可提高土壤自然失水时苹果叶片脯氨酸的含量, 进而维持叶片的高 WUE [21]。林冠修剪也可以提高苹果 WUE。合理的修剪可以改善树体间光照条件, 调控植物的营养分配, 增强光合作用, 使营养生长和生殖生长平衡, 利于果园高产和稳产 [22]。一定程度的修剪可以促进产量和水分利用效率, 轻度修剪 (去除 10% 的侧枝长度) 和中度修剪 (去除 25% 的侧枝长度) 的产量分别比对照提高 22.1% 和 6.4%, 而重度修剪 (去除 40% 的侧枝长度) 的产量显著低于轻度修剪 ($p < 0.05$), 轻度和中度修剪处理的水分利用效率显著高于重度修剪和对照 ($p < 0.05$), 中度修剪的水分

利用效率比对照提高 18.7%^[23]。增加适当的人为管理措施可以显著增加苹果叶片的 WUE。



注: y_1 、 R_1 、 P_1 表示苹果; y_2 、 R_2 、 P_2 表示刺槐。

图 3 黄土高原叶片 WUE 与环境因素关系

从图 1 可以看出,苹果叶片分布于高 WUE 值的区间内,且相比刺槐叶片 WUE 分布更为集中。造成此现象的原因可能是因为苹果受人为管理因素较多,大多都维持着高叶片 WUE,而刺槐缺少人为管理,其叶片 WUE 主要随立地环境条件的变化而变化,且刺槐所处环境差别较大,造成刺槐叶片 WUE 易出现极大值和极小值的现象。未来可以加强对刺槐林等乔木林的精细化管理,以提高其叶片 WUE,进一步推动退耕还林工程的可持续发展。

3.2 苹果和刺槐叶片 WUE 与环境因子的关系

植物叶片 WUE 往往受降水量、温度、日照时间、湿度等气候及多种环境因素的影响,并且各种环境因子之间还相互影响,可能对植物叶片 WUE 有着相反作用的影响。

大量研究^[24]表明,降水是影响叶片 WUE 的主要因素,叶片 WUE 与降水呈负相关,这种负相关在干旱地区比在湿润地区更明显。在本研究中,黄土高原苹果和刺槐的 WUE 值与年均降水量呈显著负相关($p < 0.001$),这与上述观点一致。降水通过影响作物在生育期内的饱和水汽压差和相对湿度来影响植物的 WUE,干旱地区的低降水、低空气湿度等因素会导致植物叶片气孔关闭,气孔导度和植物叶胞间 CO₂ 浓度降低,最后导致 $\delta^{13}\text{C}$ (WUE)增加。在本研究中又添加了年均水汽压和年均相对湿度 2 个环境因子,可以看出植物 WUE 随年均水汽压和年均相对湿度的增加而显著减小,这与 Ma 等^[25]研究结果一致。在 Zheng 等^[24]研究中,降水对黄土高原叶片 WUE 值影响最大,可以解释 13.3% 的空间变异。但是在本研究的所有环境变量中,叶片 WUE 则对年均水汽压的响应最为明显,可能水汽压对叶片 WUE 的影响比降水更为直接。Gulias 等^[26]研究表明,水汽压是影响植物叶片 WUE 最主要的环境因子,而 Ponton 等^[27]对 3 个生态系统的群体 WUE 进行了分析比较发现,3 个群体的 WUE 均与水汽压具有显著的负相关关系,而且 3 个群体 WUE 差异的主要原因也是因为水汽压的不同。

温度也是影响叶片 WUE 的重要因素。由于其影响机制较为复杂,目前研究也各有不同。Loader 等^[28]研究认为,温度升高可提高植物的光合能力,从而提高 WUE;但 Nicotra 等^[29]研究发现,温度更大程度上影响植物的蒸腾作用,一定程度上可使 WUE 降低。本研究中,可能由于黄土高原蒸腾能力较强,温度的改变对植物的蒸腾作用较明显,所以随着温度的升高,苹果和刺槐叶片 WUE 均显著降低。

在本研究中,叶片 WUE 随着日照时间的增加而增加。这是因为在光照的条件下,叶片细胞间隙 CO₂ 浓度与空气中 CO₂ 浓度比值降低^[25],并由公式 (1) 可得,空气中 CO₂ 浓度与叶片细胞间隙 CO₂ 浓度

的差减小,所以叶片 WUE 增大。再加上黄土高原位于北半球,在春分日至秋分日期间,纬度越高,纬线圈处于阳面圈的时间越长,光照时间和强度越大,在空气中 CO₂ 浓度一致时,光合速率在一定范围内随光照强度的增大而上升,从而 WUE 也随之增大。这与 Zheng 等^[24] 和 Ma 等^[25] 研究结果均一致。

3.3 苹果和刺槐叶片 WUE 在气候分区中的差异

因为黄土高原气候具有显著的分区差异,叶片 WUE 随着环境因子也变化显著,所以黄土高原苹果和刺槐 WUE 具有显著差异。在气候分区中,同一植物半干旱区的叶片 WUE 高于半湿润区的叶片 WUE。其中

表 3 黄土高原气候分区环境因子平均值

气候分区	年均降水量/mm	年均温度/℃	年均日照时间/h	平均相对湿度/%	平均水汽压/hPa
半干旱地区	485.15	9.39	2430.94	61.06	8.48
半湿润地区	599.22	12.41	2151.08	65.63	10.60

4 结论

(1)因存在人为管理的因素,苹果叶片 WUE 显著大于刺槐叶片 WUE,刺槐叶片 WUE 随着环境改变其变化幅度大于苹果叶片;

(2)半干旱区苹果和刺槐 WUE 均高于半湿润区,其中半干旱区苹果叶片 WUE 比半湿润区苹果叶片 WUE 高 12.5%,半干旱区刺槐叶片 WUE 比半湿润区刺槐叶片 WUE 高 6.4%;

(3)叶片 WUE 对各环境因子的响应一致,且年均水汽压的响应较其他环境因子更敏感。本研究建议可对黄土高原人工刺槐林适当增加人为管理措施以进一步提高其 WUE;要注重不同气候区的影响,充分考虑当地环境因子(如平均水汽压),适地适树,保持合理的种植密度和结构。

参考文献:

[1] Wang D, Wang L. Dynamics of evapotranspiration partitioning for apple trees of different ages in a semiarid region of northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 191: 1-15.

[2] 单长卷,梁宗锁,郝文芳.黄土高原刺槐林生长与土壤水分关系研究进展[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(8): 1341-1346.

[3] Zhang B Q, Wu P T, Zhao X N, et al. Assessing the spatial and temporal variation of the rainwater harvesting potential (1971—2010) on the Chinese Loess Plateau using the VIC model[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(3): 534-544.

[4] 邵蕊,李焱,张宝庆.黄土高原退耕还林(草)以来植被水分利用效率的时空特征及预测[J]. *科技导报*, 2020, 38(17): 81-91.

[5] Feng X, Fu B, Piao S, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J].

半干旱区苹果叶片 WUE 比半湿润区苹果叶片 WUE 高 12.5%,半干旱区刺槐叶片 WUE 比半湿润区刺槐叶片 WUE 高 6.4%。这与前文对影响 WUE 气候因素的分析结果一致,因为半干旱地区具有较低的降水量、相对湿度和水汽压等(表 3),所以叶片 WUE 较高。而半干旱区相较于半湿润区苹果叶片 WUE 的增幅大于刺槐叶片 WUE,其可能原因是刺槐大多生长于高山、沟谷中,缺乏人为管理,对气候因子变化的响应较为敏感,刺槐叶片 WUE 变化幅度较大,所以较一定人为管理的苹果,其相对变化较小。未来可以加强对半湿润地区乔木林的人为管理,以提高 WUE。

Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.

[6] 张桂玲,李艳琴,罗绪强,等.季节性干旱下喀斯特次生林不同树种水分利用效率变化[J]. *地球与环境*, 2021, 49(1): 25-31.

[7] 艾则孜提约麦尔·麦麦提,玉素甫江·如素力,何辉,等.2000—2017 年新疆天山植被水分利用效率时空特征及其与气候因子关系分析[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(6): 490-500.

[8] Tang X, Li H, Desai A R, et al. How is water-use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on Earth? [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: e7483.

[9] Chen J, Chang S X, Anyia A O. The physiology and stability of leaf carbon isotope discrimination as a measure of water-use efficiency in barley on the Canadian Prairies[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2011, 197(1): 1-11.

[10] 徐晓丽.黄土高原刺槐适生区适宜盖度研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2019.

[11] 张强强.中国苹果生产布局演变与优势评价研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2021.

[12] Wang S F, An J, Zhao X N, et al. Age- and climate- related water use patterns of apple trees on China's Loess Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: e124462.

[13] 杨艳芬,王兵,王国梁,等.黄土高原生态分区及概况[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7389-7397.

[14] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 1989, 40(1): 503-537.

[15] 余新晓,杨芝歌,白艳婧,等.基于 δ¹³C 值的北京山区典型树种水分利用效率研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(4): 593-599.

[16] O'Leary M H. Carbon isotopic fractionation in plants [J]. *Phytochemistry*, 1981, 20(4): 553-567.

- [22] 刘佳,袁宏伟,杨继伟.不同气候条件下不同生育期干旱胁迫对冬小麦耗水量和水分利用效率的影响[J].节水灌溉,2020(12):22-27,31.
- [23] 刘为健,杨文稼,王盈盈,等.2 个小麦品种水分利用效率的差异及其与深层水分利用的关系[J].水土保持学报,2020,34(3):245-251,258.
- [24] 黄玲,高阳,邱新强,等.灌水量和时期对不同品种冬小麦产量和耗水特性的影响[J].农业工程学报,2013,29(14):99-108.
- [25] 黄超,刘战东,赵彝,等.不同产量水平下冬小麦生长发育和耗水特性研究[J].灌溉排水学报,2019,38(10):10-16.
- [26] 闫学梅,于振文,张永丽,等.不同小麦品种耗水特性和籽粒产量的差异[J].应用生态学报,2011,22(3):694-700.
- [27] Rejeth R, Manikanta C L N, Beena R, et al. Water stress mediated root trait dynamics and identification of microsatellite markers associated with root traits in rice (*Oryza sativa* L.)[J].Physiology and Molecular Biology of Plants,2020,26(6):1225-1236.
- [28] 张芸香,王林,田吉,等.盐碱胁迫对文冠果幼苗水力学特征和碳素分配的影响[J].水土保持学报,2019,3(6):299-304.
- [29] 柏彦超,钱晓晴,沈淮东,等.不同水、氮条件对水稻苗生长及伤流液的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(1):76-81.
- [30] Luo H H, Tao X P, Hu Y Y, et al. Response of cotton root growth and yield to root restriction under various water and nitrogen regimes[J].Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2015,178(3):384-392.
- [31] 闫振华,刘东尧,贾绪存,等.花期高温干旱对玉米雄穗发育、生理特性和产量影响[J].中国农业科学,2021,54(17):3592-3608.
- [32] Alhoshan M, Ramin A A, Zahedi M, et al. Effects of water deficit on shoot, root and some physiological characteristics in some greenhouse grown potato cultivars[J].Journal of Crop Science and Biotechnology,2020,23:433-444.
- [33] 王美,赵广才,石书兵,等.施氮及花后土壤相对含水量对黑粒小麦灌浆期氮素吸收转运及分配的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(7):864-873.
- [34] Wu B, Zhang H, Wang D. Timely supplemental irrigation changed nitrogen use of wheat by regulating root vertical distribution[J].Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2018,181(3):396-408.
- [35] 张胜全,方保停,王志敏,等.春灌模式对晚播冬小麦水分利用及产量形成的影响[J].生态学报,2009,29(4):2035-2044.
- [36] Panda R K, Behera S K, Kashyap P S. Effective management of irrigation water for wheat under stressed-conditions[J].Agricultural Water Management,2003,63(1):37-56.

(上接第 252 页)

- [17] Wang G A, Han J M, Liu D S. The carbon isotope composition of C₃ herbaceous plants in loess area of northern China[J].Science In China (Earth Sciences),2003,46(10):1069-1076.
- [18] 曲桂敏,束怀瑞,王鸿霞.钾对苹果树水分利用效率及有关参数的影响[J].土壤学报,2000,37(2):257-262.
- [19] 曲桂敏,王鸿霞,束怀瑞.氮对苹果幼树水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2000,11(2):199-201.
- [20] 孙霞,柴仲平,蒋平安.不同氮磷钾肥配比对新疆红富士苹果光合特性的影响[J].西南农业学报,2012,25(4):1352-1357.
- [21] 接玉玲,张伟,杨洪强,等.有机物对苹果叶片脯氨酸和水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2008,24(5):20-24.
- [22] 何方,胡芳名.经济林栽培学[M].2 版.北京:中国林业出版社,2004:242-253.
- [23] 叶苗泰.黄土高原林冠修剪对山地苹果耗水与生产的调控及模拟[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [24] Zheng S X, Shang Guan Z P. Spatial patterns of foliar stable carbon isotope compositions of C₃ plant species in the Loess Plateau of China[J].Ecological Research,2007,22(2):342-353.
- [25] Ma J Y, Chen T, Qiang W Y, et al. Correlations between foliar stable carbon isotope composition and environmental factors in desert plant *Reaumuria soongorica* (Pall.) Maxim[J].Journal of Integrative Plant Biology,2005,47(9):1065-1073.
- [26] Gulias J, Seddaiu G, Cifre J, et al. Leaf and plant water use efficiency in cocksfoot and tall fescue accessions under differing soil water availability[J].Crop Physiology,2012,52(5):2321-2331.
- [27] Ponton S, Flanagan L B, Alstad K P, et al. Comparison of ecosystem water-use efficiency among Douglas-fir forest, aspen forest and grassland using eddy covariance and carbon isotope techniques[J].Global Change Biology,2010,12(2):294-310.
- [28] Loader N J, Switsur V R, Field E M. High-resolution stable isotope analysis of tree rings: Implications of 'microdendroclimatology' for palaeoenvironmental research[J].Holocene,1995,5(4):457-460.
- [29] Nicotra A B, Cosgrove M J, Cowling A, et al. Leaf shape linked to photosynthetic rates and temperature optima in South African Pelargonium species[J].Oecologia,2008,154(4):625-635.