

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.04.003

# 太行山南麓核桃-菘蓝/决明复合系统 种间水分关系

何春霞<sup>1,2</sup>, 陈平<sup>1,3</sup>, 张劲松<sup>1,2\*</sup>, 孟平<sup>1,2\*</sup>, 孙守家<sup>1,2</sup>, 高峻<sup>1,2</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091; 2. 南京林业大学  
南方现代林业协同创新中心, 江苏南京 210037; 3. 河北省水利水电勘测设计研究院, 天津 300250)

**摘要:** [目的] 旨在通过研究不同果药复合模式的种间水分竞争/互惠关系, 为太行山南麓低丘山区高效果农复合模式筛选提供理论依据。[方法] 采用稳定碳同位素方法, 结合热扩散探针等技术, 研究核桃-菘蓝/决明复合系统的水分利用效率 ( $WUE$ )、耗水量和土壤含水量等, 以期量化其种间水分关系。[结果] 复合系统的土壤含水量比单作核桃和单作作物地块的均有较大提高, 单作核桃的土壤含水量也高于单作作物。菘蓝的  $WUE$  均随着其生长逐渐减小, 而决明的  $WUE$  则是 2012 年随生长增大、2013 年减少。单作核桃、单作菘蓝/决明的耗水量均高于间作核桃、间作菘蓝/决明, 其中, 在 2012 年和 2013 年, 单作核桃的耗水量分别是间作核桃的 1.11、1.07 倍, 单作菘蓝的耗水量分别是间作菘蓝的 1.83、1.96 倍, 单作决明的耗水量分别是间作决明的 2.26、2.60 倍。在复合系统中, 核桃的耗水量在 2012 年与药材相当, 2013 年则高于药材。核桃树行中间处菘蓝和决明的总耗水量均显著高于其他位置 (除了 2013 年菘蓝及决明开花期分别略低于其他位置处)。在 2012 年, 间作系统的总收入分别是单作核桃和单作药材的 1.47、1.24 倍, 在 2013 年为 1.24、1.49 倍。[结论] 核桃药材复合系统提高了土壤含水量, 降低了总耗水量; 复合系统的产量土地当量比达到 1.9 左右, 比单作系统明显提高。虽然复合系统的核桃产量比单作核桃有所减少, 但加上药材收入后, 总收入为单作系统的 1.2 倍以上, 增加了经济收益。因此, 核桃-菘蓝/决明复合系统适合在该区推广。

**关键词:** 农林复合系统; 核桃; 菘蓝; 决明; 稳定碳同位素比率 ( $\delta^{13}C$ ); 种间水分关系

**中图分类号:** S664.1; S567.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2021)04-0022-10

通过林木和作物的合理间作, 农林复合系统能充分利用水肥光热资源, 既能保持生态功能, 又能在降低投入的情况下可持续获得林产品 (木材或果实)<sup>[1]</sup> 和作物收成, 如 Niether 等<sup>[2]</sup> 对可可树 (*Theobroma cacao* Linn.)、Sun 等<sup>[3]</sup>、孙守家等<sup>[4]</sup> 和何春霞等<sup>[5]</sup> 对核桃 (*Juglans regia* L.)-绿豆 (*Vigna radiate* (L.) Wilczek) 或小麦 (*Triticum aestivum* L.) 等及 Rivest 等<sup>[6]</sup> 对杨树 (*Populus nigra* × *P. maximowiczii*) /大豆 (*Glycine max* (L.) Merr.) 等的研究都表明, 农林间作比单作具有产

量优势; Muñoz-Villers 等<sup>[7]</sup> 研究得出咖啡 (*Coffea arabica* L.) 复合系统的种间水分互补关系。也有农林复合系统种间水分竞争的报导, 如核桃树/花生 (*Arachis hypogaea* L.)<sup>[8]</sup>、旱季的南酸枣 (*Choerospondias axillaris* (Roxb.) Burtt et Hill.) /花生<sup>[9]</sup> 及枣农间作系统<sup>[10]</sup>。量化不同复合系统的种间水分关系, 有助于合理选择和配置农林复合系统<sup>[4]</sup>。

农林复合系统中, 林木的耗水规律可通过液流法<sup>[11]</sup> 估算, 而作物耗水却不易估算。能量平衡法估算的耗水<sup>[12]</sup> 包括植物蒸腾和土壤蒸发, 二者无法

收稿日期: 2021-01-20 修回日期: 2021-04-26

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务资金项目 (CAFYBB2020SY001)

\* 通讯作者: 张劲松, 博士, 研究员。主要研究方向: 林业气象学。电话: 62889636。E-mail: zhangjs@caf.ac.cn; 孟平, 博士, 研究员。主要研究方向: 林业气象学。Email: mengping@caf.ac.cn

区分开来。涡度相关法能区分农田的土壤蒸发和作物蒸腾<sup>[13]</sup>,但不适用于下垫面不一致的农林复合系统。植物稳定碳同位素比率( $\delta^{13}\text{C}$ )整合了其生长过程的水分状况,与植物水分利用效率( $WUE$ )成正比,能指示其长期水分状况<sup>[14-16]</sup>。因为干旱时,叶片内外水汽压差增加,叶片会关闭气孔、降低导度以减少蒸腾和充分利用水分,这也引起胞间 $\text{CO}_2$ 浓度降低,使得光合作用对 $^{13}\text{C}$ 的甄别率降低,最终造成叶片中 $^{13}\text{C}$ 富集、 $\delta^{13}\text{C}$ 增大<sup>[17]</sup>。结合作物的 $WUE$ 和生物量可估算其耗水量<sup>[18]</sup>,且只需少量组织,能简化农林复合系统的水分关系研究。

在太行山南麓低丘山区,立地和灌溉条件差,季节性干旱等极端气候频发,导致水分亏缺制约其农林业发展,当地为了增收大力发展果树与作物等间作。核桃位居中国四大干果之首,适应性强,具有水土保持等生态功能。决明(*Cassia tora* Linn.)是豆科药材,种子可明目。菘蓝(*Isatis tinctoria* Linnaeus, 板蓝根)属十字花科药材,具清热解毒,凉血消斑功效。这2种药材虽在华北复合农林实践中广泛栽培,但其种间关系研究尚且匮乏。本文采用稳定碳同位素方法,结合树干液流,研究该区核桃-决明/菘蓝复合系统的耗水特征和水分利用等,旨在量化其种间水分关系,并为3种植物的管理和当地农林复合系统的优化提供理论依据。

## 1 试验地概况及材料

### 1.1 试验地概况

试验地设在黄河小浪底森林生态系统国家定位研究站(35.02°N, 112.47°E),地处太行山南麓,属暖温带大陆性季风气候。年均日照时数2 367.7 h,年降水量641.7 mm(6—9月占68.3%)。土壤母质多为石灰岩,风化淋溶后形成褐土,土层厚度50~80 cm,石砾含量10%~18%,pH值7.6~8.5,速效氮、磷、钾含量分别为21.4~80.0、2.60~8.16、60~102.35  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有机质含量为8.28~16.5  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验材料

试验地位于东西长140~200 m、南北宽20~30 m的水平梯田上。于2006年核桃东西向种植,株×行距为3 m×8 m,树高、地径和冠幅均值分别为5.2 m、14.1 cm和2.7 m。菘蓝为秋种夏收,决明为夏种秋收。菘蓝于2011年11月15日播种,2012年6月8日收获;7月3日换茬决明,10

月10日采收;11月19日再播种菘蓝,2013年6月15日收获;6月22日换茬决明,10月17日采收。菘蓝/决明的株×行距均为20 cm×50 cm,南、北侧离核桃树1.5 m。单作菘蓝/决明位于复合系统50 m外的梯田上。试验期间无灌溉补水措施。

## 2 研究方法

### 2.1 气象因子和土壤含水量监测

小气候自动观测系统观测空气温度( $T_a$ )、相对湿度( $RH$ )和降雨量( $RF$ ),温湿度传感器为HMP45C(Vaisala Inc., Vantaa, Finland),雨量筒传感器和数据采集器为TE525M和CR10X(Campbell Scientific Inc., Logan, USA)。

TDR(Time Domain Reflectometry)和TRIME-T3(IMKO Inc., German)测定0~20、20~40、40~60、60~80 cm深度的土壤含水量。TDR管理设在核桃树行北侧0.5 m(N0.5)、1.5 m(N1.5)、中间4 m(M)和南侧1.5 m(S1.5)处,图1所示为1个测点,设3个测点作为重复,单作药草地中也埋设3个测点。

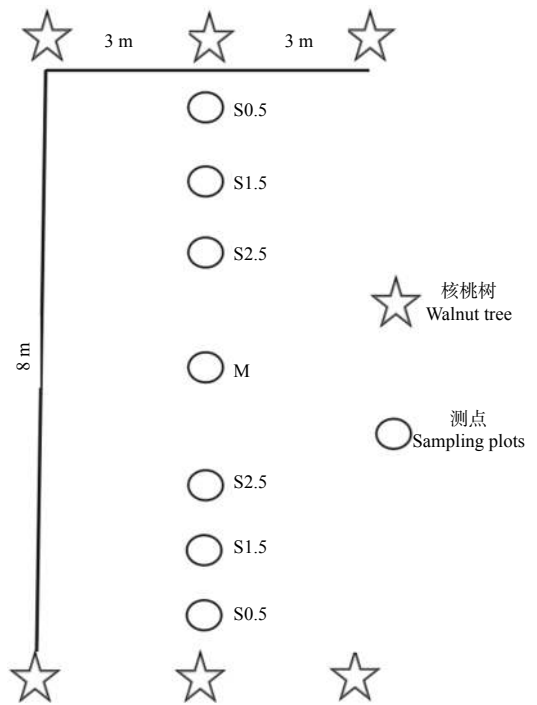


图1 试验区测点布设示意图

Fig. 1 Sketch of sampling spots in the experiment field

### 2.2 植物稳定碳同位素比率( $\delta^{13}\text{C}$ )及水分利用效率( $WUE$ )、耗水量( $WU$ )的测算

#### 2.2.1 植物稳定碳同位素比率( $\delta^{13}\text{C}$ )的测算

2012、2013年分别于菘蓝苗期（03-22、03-28）、开花期（04-25、04-26）、成熟期（05-30、05-31）和决明苗期（07-26、07-19）、开花期（08-27、08-24）、成熟期（09-18、09-25）取样。核桃取树冠中部南向叶片；在N1.5、N2.5、M、S2.5、S1.5位置处（图1，共重复3个测点）对菘蓝/决明各部分取样（每样品为5株混合），测定生物量。叶片烘干、粉碎、过筛后在中国林业科学研究院质谱实验室用元素分析仪（Thermo Scientific Flash1112 HT，美国）和质谱仪（DELTA V Advantage Isotope Ratio Mass Spectrometer）测定 $\delta^{13}\text{C}$ 值。计算公式如下<sup>[19]</sup>：

$$\delta^{13}\text{C} = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式（1）中： $R_{\text{sample}}$ 和 $R_{\text{standard}}$ 分别是样品和标准物质PDB（Pee Dee Belemnite）的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值， $\delta^{13}\text{C}$ 表示样品 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 与标准样品PDB偏离的千分率，测定精度为0.1‰。

2.2.2 水分利用效率（WUE）的测算 根据Farquhar等<sup>[17, 19]</sup>的研究计算水分利用效率（WUE（ $\text{mmol C} \cdot \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ））：

$$WUE = \frac{C_a(b - \delta_a + \delta_p)}{(b - a)1.6VPD} \quad (2)$$

式（2）中： $a=4.4\text{‰}$ 、 $b=27\text{‰}$ 分别为 $\text{CO}_2$ 扩散和羧化过程中的同位素分馏系数； $C_a$ 为大气 $\text{CO}_2$ 浓度； $\delta_a$ 和 $\delta_p$ 分别为大气与植物样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值；1.6为水蒸汽和 $\text{CO}_2$ 在大气中的扩散比率。 $\delta_a$ 和 $C_a$ 的数据来自定位站的 $\text{CO}_2$ 同位素在线分析系统（Los Gatos Research, USA）。VPD为叶片内外蒸汽压差（kPa），计算公式如下<sup>[18]</sup>：

$$VPD = 0.611 \times 10^{17.5027/(240.97+T)} \times (1 - RH) \quad (3)$$

式（3）中： $T$ 为叶温，根据研究气温每升高 $1^\circ\text{C}$ ，叶温升高 $0.72^\circ\text{C}$ <sup>[20]</sup>； $RH$ 表示大气相对湿度；0.611为气温 $0^\circ\text{C}$ 时纯水平面上的饱和水汽压。

2.2.3 植物耗水量（WU）测算 一段时期内植物耗水量（WU）为其碳同化量与WUE的乘积，碳同化量即各器官的干生物量（DW，g）乘以含碳率（CC， $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ），即：

$$WU = WUE \times DW \times CC \quad (4)$$

将式（2）中： $WUE$ 的单位由 $\text{mmol C} \cdot \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ 换算成 $\text{mg C} \cdot \text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ，代入式（4），即可计算出单位面积菘蓝/决明的耗水量，为方便比较，除以土地面积，将耗水量换算成以mm为单位。

产量土地当量比（LER）计算公式<sup>[21]</sup>为：

$$LER = Y_1/Y_1' + Y_2/Y_2' + Y_3/Y_3' \quad (5)$$

式（5）中： $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$ 和 $Y_1'$ 、 $Y_2'$ 、 $Y_3'$ 分别为间作菘蓝、间作决明、间作核桃和单作菘蓝、单作决明、单作核桃的单位面积的产量。

产值水分利用效率（WUEe， $\text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ）<sup>[21]</sup>计算公式为：

$$WUEe = \text{单位面积经济产值/耗水量} \quad (6)$$

### 2.3 核桃树干液流测定及耗水量计算

对间作和单作核桃，分别选5棵标准木，采用热扩散法（TDP-30，北京雨根公司）测定树干液流。数据采集器为CR1000X（Campbell Scientific Inc., Logan, USA）。液流测算公式如下<sup>[11]</sup>：

$$F_d = 118.99K^{1.231} \quad (7)$$

$$F_s = F_d \times SA \times 3.6 \quad (8)$$

$$K = \frac{dT_M - dT}{dT} \quad (9)$$

$$SA = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \quad (10)$$

式（7）~（10）中： $F_d$ 为液流密度（ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）； $F_s$ 为液流速率（ $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ ）； $K$ 为无量纲参数； $dT$ 为2个探针某时刻的温差值， $dT_M$ 为日温差最大值； $SA$ 为树干边材面积（ $\text{cm}^2$ ）， $D$ 和 $d$ 分别为去皮和心材直径（cm）。试验后用生长锥取探针处树干的树芯，计算边材面积。将单株核桃的液流速率按时间积分得到其耗水量，乘以核桃密度（ $416 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ ）得出林分耗水量（mm）。

### 2.4 数据分析

采用EXCEL对数据进行分析并作图，采用SPSS18.0统计软件对数据进行统计分析。

## 3 结果和分析

### 3.1 研究地气象因子的季节变化

图2为研究区生长季（4—10月）的气象因子，2012年和2013年的年均气温、相对空气湿度和总降水量分别为 $22.18^\circ\text{C}$ 、 $64.86\%$ 、 $493.0 \text{mm}$ 和 $22.41^\circ\text{C}$ 、 $70.64\%$ 、 $409.0 \text{mm}$ 。

### 3.2 不同系统不同时期的土壤含水量及药材的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和WUE

3.2.1 不同系统间不同时期的土壤含水量 单作和间作系统的土壤含水量季节变化见图3。受降雨分

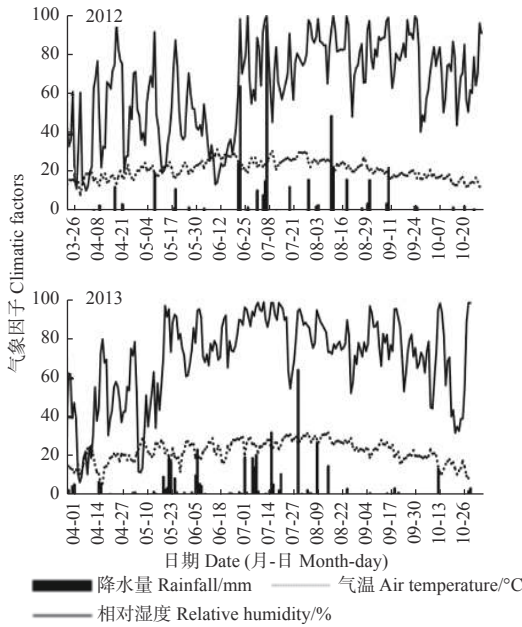
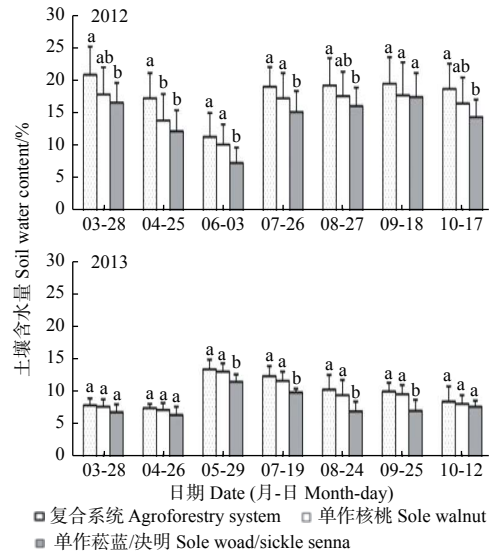


图2 研究地 2012 年和 2013 年生长季的气象因子  
Fig. 2 Climatic factors in the year 2012 and 2013 at the study area.



注: 图中字母表示同一时期不同系统间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。  
Notes: Letters indicates significant difference between different systems at the same period ( $P < 0.05$ ). The same below.

图3 2012 年和 2013 年不同系统 0~80 cm 土层平均土壤含水量的时间动态变化  
Fig. 3 Temporal variation of soil water content at different intercropping systems in 2012 and 2013

布影响, 总体 2012 年土壤含水量高于 2013 年。2012 年, 土壤含水量均随菘蓝生长逐渐减少; 在决明生长时期土壤含水量较高且随其生长变化不大。2013 年, 菘蓝生长前期土壤较干旱 (含水量仅 10% 左右), 生长后期 (5 月 29 日) 受降雨补充有所提高; 土壤含水量则随决明生长缓慢减少。

在同一时期, 土壤含水量为: 复合系统 > 单作核桃 > 单作菘蓝/决明 (图 3), 除 2012 年 4 月 25 日外, 复合系统与单作核桃均差异不显著。除 2012 年 9 月 18 日, 2013 年 3 月 28、4 月 26 和 10 月 12 日三者差异不显著外, 复合系统与单作菘蓝/决明其他时期均差异显著 ( $P < 0.05$ )。单作核桃在 2012 年 6 月 3 日、7 月 26 日和 2013 年 5—9 月

也显著高于单作菘蓝/决明。2012、2013 年复合系统的土壤含水量在上半年比单作菘蓝分别增加 26.74% 和 7.93%, 下半年比单作决明分别增加 17.39% 和 13.65%。

3.2.2 不同系统不同时期药材的  $\delta^{13}C$  值 图 4 表明: 随着菘蓝和决明生长, 其  $\delta^{13}C$  值均逐渐增大; 间作菘蓝和决明的  $\delta^{13}C$  均低于对应的单作, 2012、2013 年间作菘蓝比单作菘蓝分别低 3.61%、3.88%, 间作决明比单作决明分别低 2.95%、1.01%; 除了 2013 年开花期和成熟期间作决明略高于间作菘蓝外, 决明的  $\delta^{13}C$  总体小于菘蓝的。

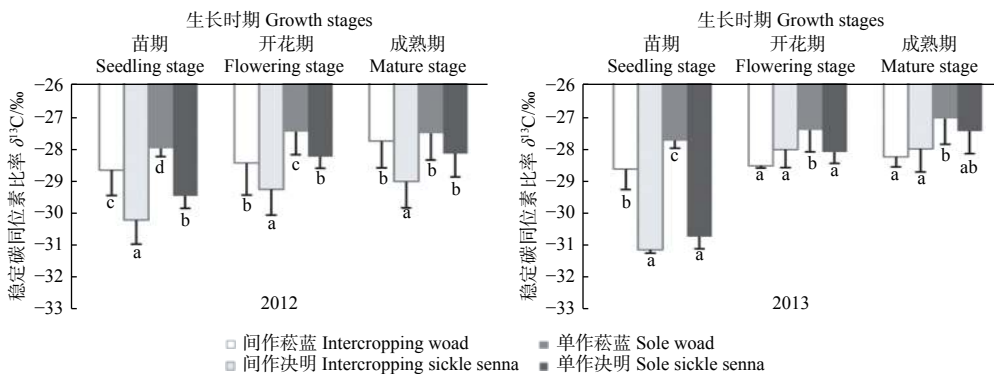


图4 2012 年和 2013 年不同系统药材  $\delta^{13}C$  的季节变化  
Fig. 4 Seasonal variation of crop leaf  $\delta^{13}C$  at different intercropping systems in 2012 and 2013

3.2.3 不同系统不同时期药材的  $WUE$  图 5 表明: 菘蓝的水分利用效率 ( $WUE$ ) 随其生长逐渐减少 (同时期间作、单作菘蓝差异不显著); 决明

的  $WUE$  在 2012 年随生长逐渐增加, 2013 年则逐渐减少, 且间作决明在 2012 年成熟期和 2013 年苗期显著低于单作决明。

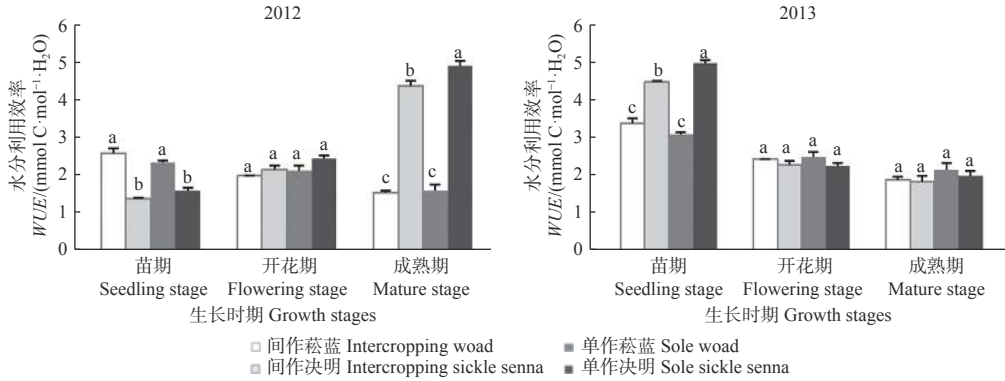


图 5 2012 年和 2013 年不同系统各组分  $WUE$  的季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of leaf  $WUE$  at different intercropping systems in 2012 and 2013

### 3.3 间作系统不同位置的土壤含水量及药材的 $\delta^{13}C$ 值和 $WUE$

3.3.1 间作系统不同位置的土壤含水量 图 6 表明: 间作系统中的土壤含水量总体表现为树行中间位置 (M) 处最低, 而距离核桃树较近的位置较高。

间作系统中, 在 2012 年苗期和开花期, 菘蓝的  $WUE$  为 S2.5 处最低, 而 M 和 S1.5 处较高; 在 2013 年苗期为 M 和 S1.5 处较高, S2.5 处最低, 成熟期则 S1.5 处最低。决明的  $WUE$  在 2012 年苗期和开花期均为 M 处最高, 在 2013 年总体为 N2.5 处最高。

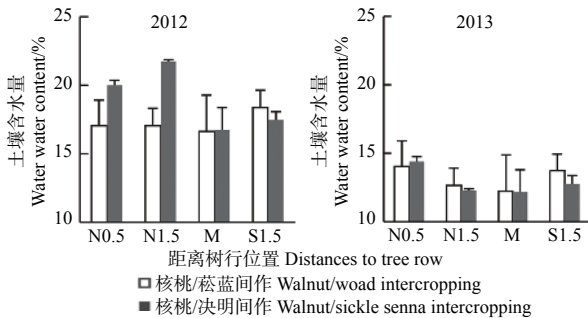


图 6 2012 年和 2013 年间作系统土壤含水量的水平变化特征

Fig. 6 Horizontal variation of soil water content at the intercropping system in 2012 and 2013

3.3.2 间作系统不同位置药材的  $\delta^{13}C$  值 图 7 表明: 间作系统中, 2012 年菘蓝的  $\delta^{13}C$  各时期均为 S2.5 处最小, 苗期的 M 和 S1.5 处及成熟期的 N2.5 和 S1.5 处较高; 2013 年苗期仍为 S2.5 处最低, M 和 S1.5 处较高, 成熟期则 S1.5 和 N2.5 处较低, M 和 S2.5 处较高。2012 年决明苗期的  $\delta^{13}C$  值为 N1.5 处最低; 开花期和成熟期为 M 处最高; 2013 年决明开花期在 N2.5 和 M 处及成熟期在 N2.5 处显著高于其他位置。

3.3.3 间作系统不同位置药材的  $WUE$  图 8 表明:

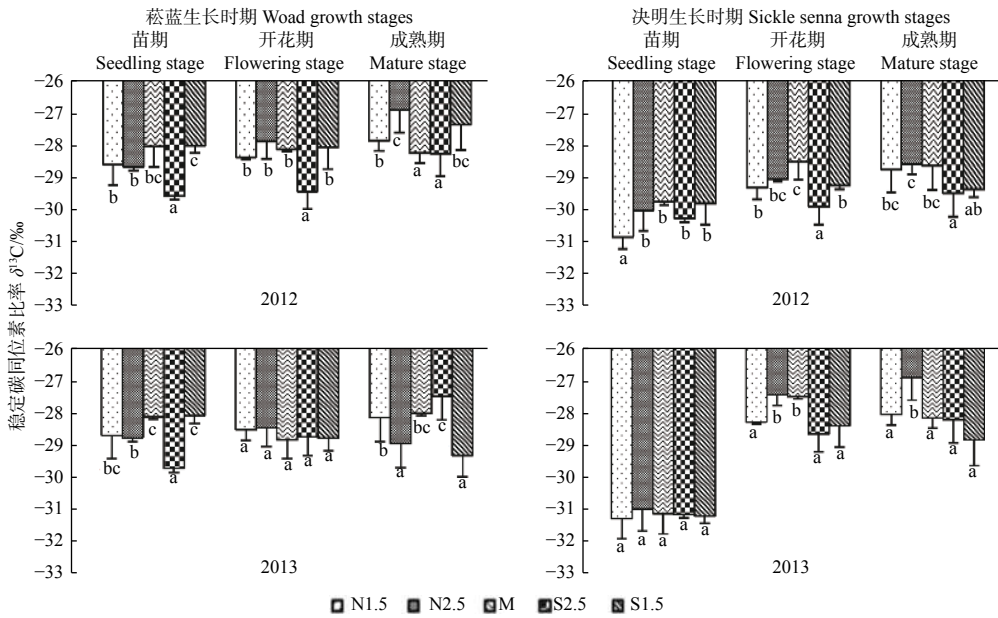
### 3.4 不同系统核桃和药材的耗水量

3.4.1 不同系统不同生长时期的耗水量 核桃在 6—8 月 (菘蓝成熟期和决明苗期、开花期) 的耗水量较大 (图 9), 间作核桃、单作核桃在 2012 和 2013 年分别约占其生长季总耗水的 69.03%、68.36% 和 71.38%、69.90%; 间作和单作核桃的生长季 (4—10 月) 总耗水量在 2012 年分别为 104.79、116.21 mm, 2013 年分别为 104.44、112.13 mm, 单作比间作分别高 10.90%、7.36%。

菘蓝和决明的耗水量随其生长逐渐增加, 且间作均低于单作 (图 9)。间作菘蓝、间作决明、单作菘蓝、单作决明的总耗水量在 2012 年分别为 65.15、40.17、119.10、90.97 mm, 在 2013 年分别为 23.78、64.69、47.20、167.90 mm, 2012 年菘蓝高于决明, 2013 年决明高于菘蓝。

在复合系统中, 核桃和菘蓝的耗水比例: 在 2012 年是 0.70:1, 菘蓝高于核桃, 在 2013 年则是 2.06:1, 核桃高于菘蓝。核桃和决明的耗水比在 2012 和 2013 年分别是 1.79:1 和 1.42:1, 核桃均高于决明。

3.4.2 间作系统不同位置药材的耗水量 图 10 表明: 核桃-菘蓝间作系统中, 树行南北 1.5 m 处菘



注: 图中的字母表示间作系统中距离核桃树不同位置处药材的差异显著性 ( $P < 0.05$ ), 下同。

Notes: Letters indicates significant difference between crops at different distance to walnut tree rows ( $P < 0.05$ ). The same below.

图 7 2012 年和 2013 年间作系统距离核桃不同位置菘蓝/决明叶片  $\delta^{13}C$  的季节变化

Fig. 7 Seasonal variation of leaf  $\delta^{13}C$  in woad and sickle senna of the intercropping systems at different position in 2012 and 2013

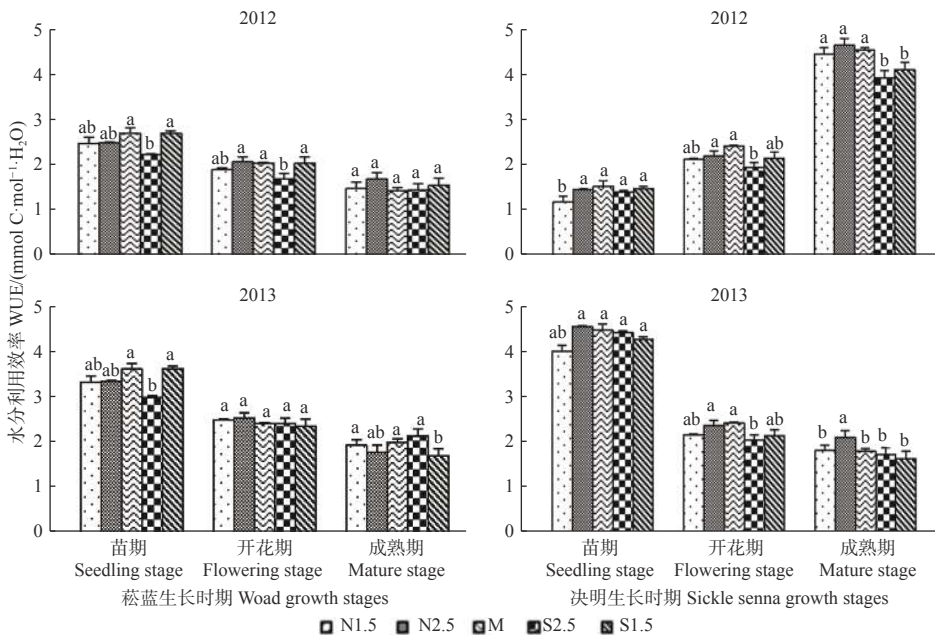


图 8 2012 年和 2013 年间作系统距离核桃不同位置菘蓝/决明 WUE 的季节变化

Fig. 8 Seasonal variation of WUE in woad and sickle senna of the intercropping systems at different positions in 2012 and 2013

蓝总耗水量最少, 其次是树行南北 2.5 m 处, M 处的最大 (2012 和 2013 年分别为 95.51、41.50 mm, 是 S1.5 处的 2.8 倍和 3.4 倍)。在核桃-决明系统中, M 处决明的总耗水量最多, 除了 2013 年开花

期 N1.5 处耗水最高外, 其他时期表现为距离树行越近耗水越少。

### 3.5 不同间作系统的经济效益

表 1 表明: 在复合系统中, 核桃、菘蓝和决明

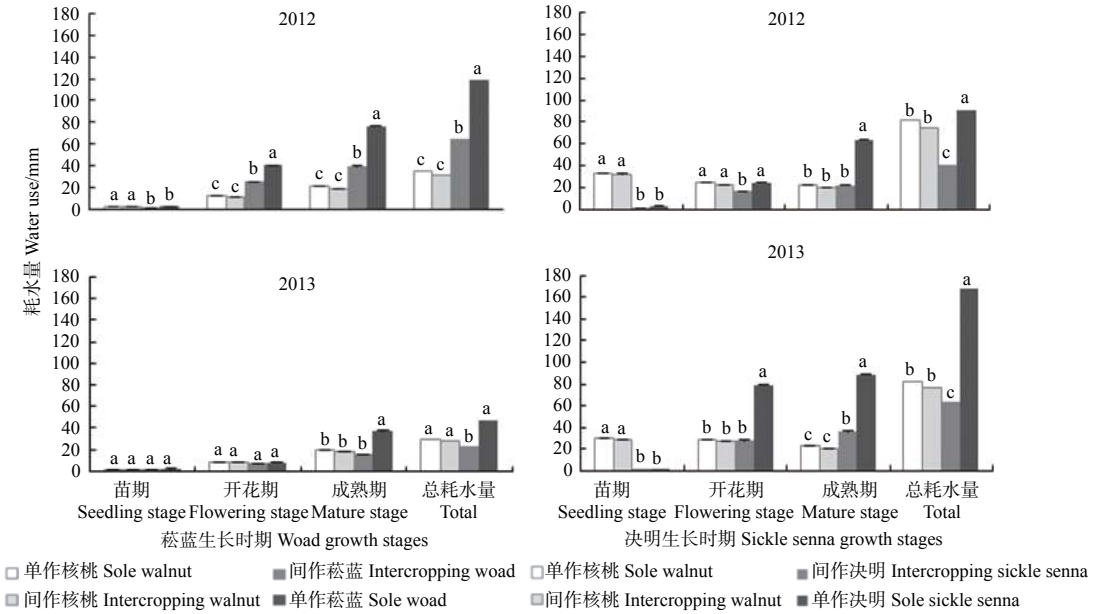


图 9 2012 年和 2013 年不同间作系统各组水分利用效率的季节变化

Fig. 9 Seasonal variation of water use in different intercropping systems in 2012 and 2013

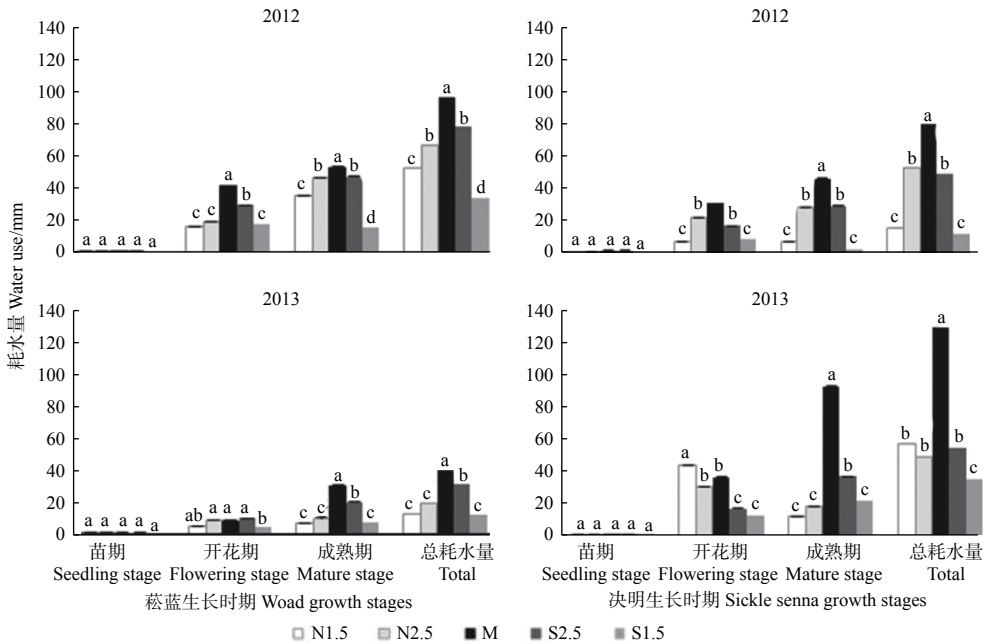


图 10 2012 年和 2013 年间作系统距离核桃不同位置菘蓝/决明耗水量的季节变化

Fig. 10 Seasonal variation of water use in woad and sickle senna of the intercropping systems at different positions in 2012 and 2013

的产量均低于对应的单作。当年每公斤绿皮核桃、菘蓝和决明的价格分别约为 10、10、4 元，计算的 2012 年复合系统、单作核桃和单作菘蓝/决明收入分别为 37 493、25 451、30 135 元·hm<sup>-2</sup>；复合系统是单作核桃的 1.47 倍、单作菘蓝/决明的 1.24 倍。2013 年复合系统、单作核桃和单作菘蓝/决明

的收入分别为 28 392、22 900、19 030 元·hm<sup>-2</sup>，均低于 2012 年，依然是复合系统最高，分别是单作核桃的 1.24 倍、单作菘蓝/决明的 1.49。复合系统的产量土地当量在 2012 和 2013 年分别为 1.98、1.89；产值水分利用效率均为单作核桃最高，2012 年和 2013 年分别为 21.90、20.42 元·t<sup>-1</sup>·hm<sup>-2</sup>，其次是复

表1 不同间作系统收获指标

Table 1 Harvest indice of different agroforestry systems

年份 Year	间作系统 System	产量 Yield/ (kg·hm <sup>-2</sup> )			收入 Income/ (元·hm <sup>-2</sup> )			产量土地当量 LER	产值水分利用效率 WUE/(元·t <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )
		核桃 Walnut	菘蓝 Woad	决明 Sickle senna	核桃 Walnut	菘蓝 Woad	决明 Sickle senna		
2012	核桃-菘蓝/决明 Walnut-Woad/Sickle senna intercropping	1 963	944	2 104	19 635	9 442	8 416	1.98	17.84
	单作核桃 Walnut monoculture	2 545	—	—	25 451	—	—	1.00	21.90
	单作菘蓝/决明 Sole Woad/Sickle senna	—	1 751	3 156	—	17 510	12 625	1.00	14.35
2013	核桃-菘蓝/决明 Walnut-Woad/Sickle senna intercropping	1 767	461	1 528	17 670	4 610	6 112	1.89	14.72
	单作核桃 Sole Walnut	2 290	—	—	22 900	—	—	1.00	20.42
	单作菘蓝/决明 Sole Woad/Sickle senna	—	901	2 505	—	9 010	10 020	1.00	8.85

合系统, 分别为 17.84、14.72 元·t<sup>-1</sup>·hm<sup>-2</sup>, 单作菘蓝/决明最低, 分别为 14.35、8.85 元·t<sup>-1</sup>·hm<sup>-2</sup>。

## 4 讨论

在 2012 和 2013 年, 复合系统的土壤含水量比单作菘蓝/决明提高 8% 以上, 也高于单作果树。这是由于核桃林带能减弱风速和乱流交换, 加上药材的间作使植被覆盖度大, 裸露土壤减少, 蒸发面积降低, 使得复合系统内部蒸散量低于开阔农田和单作核桃, 土壤含水量增加<sup>[22]</sup>。Ling 等<sup>[23]</sup>对油菜 (*Brassicarapa var. oleifera* de Candolle)/黄花菜 (*Hemerocallis citrina* Baroni) 及 Siriri 等<sup>[1]</sup>对乌干达梯田的农林复合系统研究也得出同样的结论; 但在较干旱的 2013 年, 复合系统和单作核桃的土壤含水量差异不大, 表明干旱时期复合系统的种间水分竞争可能有所加大, 从而抵消其保水效应。对南酸枣/花生<sup>[9]</sup>和枣农复合系统<sup>[10]</sup>的研究也表明干旱期间种间竞争加剧。

复合系统中, 核桃树行中间处土壤含水量较低、药材的耗水量也较多, 且在菘蓝苗期及决明的大多生长时期此处的水分利用效率 (*WUE*) 也较高, 这应是药材对复合系统不同位置处土壤含水量和小气候的生理生态反应<sup>[22]</sup>。因为, 此处核桃遮蔽少、相对湿度低, 造成药材蒸腾较强, 核桃 6—8 月耗水较多也与决明的耗水高峰重叠、吸收区域重合, 造成水分竞争加大, 加上春旱和秋旱, 此处药材会相应提高 *WUE*<sup>[15]</sup>。

从降雨分布看, 菘蓝生长时期处于春旱少雨

期, 而决明生长前中期处于雨季, 生长后期多秋旱。决明生长前中期的水分充足, 与核桃的水分竞争较少, 间作决明的水分状况好于单作决明,  $\delta^{13}\text{C}$  值和 *WUE* 反而低于单作药材。由于 2012 年春旱, 使得菘蓝时期的水分比决明的差, 其  $\delta^{13}\text{C}$  值也显著高于决明, 意味着菘蓝受到的水分亏缺更严重。

菘蓝的总耗水量 2012 年高于决明, 2013 年则低于决明, 这与其生长期降雨密切相关。2013 年生长季总降雨量比 2012 年少 84 mm, 各系统的产量均比 2012 年有所减少。间作决明的 *WUE* 小于单作决明、而复合系统中核桃、菘蓝/决明的耗水量均低于单作核桃、单作菘蓝/决明, 这些都进一步表明复合系统中核桃树冠和间作药材遮阴有效保持了系统内的水分, 使其全生育期蒸腾和耗水量降低<sup>[22, 24]</sup>。对其水分来源研究<sup>[25]</sup>也得出, 核桃-菘蓝/决明复合系统中核桃在旱季主要利用深层土壤水以避免与浅根作物的水分竞争<sup>[26]</sup>, 并对浅根药材菘蓝具有水力提升作用; 在雨季则转向以利用补充雨水的浅层土壤水为主, 表现为种间水分互利关系。2013 年核桃-菘蓝间作系统中, 核桃耗水所占比率比 2012 年明显增加, 应该与降水少、土壤干旱对菘蓝的耗水和生长影响较大但对深根的核桃影响较小有关。对咖啡间作系统<sup>[7]</sup>及其他复合系统<sup>[27]</sup>的研究也得出种间水分互补关系的结论。

豆科植物可通过根瘤固定大气中的氮素, 并提供给非豆科间作植物, 后者还能反过来促进豆科植物的固氮作用<sup>[28]</sup>, 进而提高复合系统的地力和产



量<sup>[29]</sup>, 如豆科与禾本科等作物的间作<sup>[30]</sup>。本研究中, 豆科植物决明与其他组分的氮素关系如何, 其间作能否提高复合系统的氮素和产量等, 有必要做进一步研究。

## 5 结论

在太行山南麓低丘山区的核桃-菘蓝/决明复合系统中, 土壤水分状况得到改善, 总体耗水减少, 总体收益和产量土地当量远高于单作系统。该复合模式既能达到退耕还林工程的生态效应, 又能保证农民的经济效益, 适合在太行山南麓退耕还林区推广。

## 参考文献:

- [1] Siriri D, Wilson J, Coe R, *et al.* Trees improve water storage and reduce soil evaporation in agroforestry systems on bench terraces in SW Uganda[J]. *Agroforestry System*, 2013, 87(5): 45-58.
- [2] Niether W, Schneidewind U, Fuchs M, *et al.* Below- and above-ground production in cocoa monocultures and agroforestry systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657(12): 558-567.
- [3] Sun S J, Meng P, Zhang J S, *et al.* Hydraulic lift by *Juglans regia* relates to nutrient status in the intercropped shallow-root crop plant[J]. *Plant and Soil*, 2014, 374(1-2): 629-641.
- [4] 孙守家, 孟平, 张劲松, 等. 华北石质山区核桃-绿豆复合系统碳同位素变化及其水分利用[J]. *生态学报*, 2010, 30(14): 3717-3726.
- [5] 何春霞, 孟平, 张劲松, 等. 基于稳定碳同位素技术的华北低丘山区核桃-小麦复合系统间作水分利用研究[J]. *生态学报*, 2012, 32(7): 2047-2055.
- [6] Rivest D, Cogliastro A, Bradley R L, *et al.* Intercropping hybrid poplar with soybean increases soil microbial biomass, mineral N supply and tree growth[J]. *Agroforestry System*, 2010, 80(1): 33-40.
- [7] Muñoz-Villiers L E, Geris J, Alvarado-Barrientos M S, *et al.* Coffee and shade trees show complementary use of soil water in a traditional agroforestry ecosystem[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(4): 1649-1668.
- [8] 云雷, 毕华兴, 任怡, 等. 黄土区果农复合系统间作水分关系研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(6): 110-114.
- [9] 赵英, 张斌. 低丘红壤区农林间作系统水分利用竞争性评价[J]. *土壤*, 2012, 44(4): 671-679.
- [10] 霍高鹏, 赵西宁, 高晓东, 等. 黄土丘陵区枣农复合系统土壤水分利用与竞争[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(12): 2043-2054.
- [11] Steppe K, De Pauw D J W, Doody T M, *et al.* A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2010, 150(7-8): 1046-1056.
- [12] 孟平, 张劲松, 宋兆民. 农林复合模式蒸散耗水的研究[J]. *林业科学研究*, 1996, 9(3): 221-226.
- [13] Beziat P, Rivalland V, Tallec T, *et al.* Evaluation of a simple approach for crop evapotranspiration partitioning and analysis of the water budget distribution for several crop species[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2013, 177(8): 46-56.
- [14] Schifman L A, Stella J C, Volk T A, *et al.* Carbon isotope variation in shrub willow (*Salix* spp.) ring-wood as an indicator of long-term water status, growth and survival[J]. *Biomass and bioenergy*, 2012, 36(10): 316-326.
- [15] 徐庆, 王婷, 高德强. 碳氢氧稳定同位素在草地生态系统水循环研究中的应用[J]. *林业科学研究*, 2019, 32(6): 130-136.
- [16] 李荣生, 许煌灿, 尹光天, 等. 植物水分利用效率的研究进展[J]. *林业科学研究*, 2003, 16(3): 366-371.
- [17] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1989, 40(1): 503-537.
- [18] Hu J, Moore D P, Riveros-Iregui D A, *et al.* Modelling whole-tree carbon assimilation rate using observed transpiration rates and needle sugar carbon isotope ratios[J]. *New Phytol*, 2010, 185(4): 1000-1015.
- [19] Farquhar G D, O'Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves[J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1982, 9(2): 121-137.
- [20] Allen L H, Pan D Y, Boote K J, *et al.* Carbon dioxide and temperature effects on evapotranspiration and water use efficiency of soybean[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(4): 1071-1081.
- [21] 黄伟, 张俊花, 李文红, 等. 冀西北坝上旱区南瓜油葵间作的水分效应[J]. *生态学报*, 2011, 31(14): 4072-4081.
- [22] 孟平, 张劲松, 樊巍. 中国复合农林业研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2003: 86-115, 148-159.
- [23] Ling Q, Zhao X N, Wu P, *et al.* Effect of the fodder species canola (*Brassica napus* L.) and daylily (*Hemerocallis fulva* L.) on soil physical properties and soil water content in a rainfed orchard on the semiarid Loess Plateau, China[J]. *Plant Soil*, 2020. DOI: 10.1007/s11104-019-04318-0.
- [24] Quero J L, Villar R, Marañón T, *et al.* Interactions of drought and shade effects on seedlings of four *Quercus* species: physiological and structural leaf responses[J]. *New Phytologist*, 2006, 170(4): 819-834.
- [25] 何春霞, 陈平, 孟平, 等. 华北低丘山区果药复合系统间作水分关系利用策略[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(2): 151-164.
- [26] 何春霞, 孟平, 张劲松, 等. 华北低丘山区核桃-决明子复合模式的根系分布[J]. *林业科学研究*, 2013, 26(6): 715-721.
- [27] Gao X, Liu D Z, Zhao X, *et al.* Extreme natural drought enhances interspecific facilitation in semiarid agroforestry systems[J]. *Agr. Forest. Meteorol.*, 2018, 265(7): 444-453.
- [28] 李鑫. 桑树/苜蓿间作生长优势与土壤微生物种群多样性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016: 4-5.
- [29] Fan F, Zhang F, Song Y, *et al.* Nitrogen Fixation of Faba Bean (*Vicia faba* L.) Interacting with a Non-legume in Two Contrasting Intercropping Systems[J]. *Plant and soil*, 2006, 283(1-2): 275-286.
- [30] 章家恩, 高爱霞, 徐华勤, 等. 玉米/花生间作对土壤微生物和土壤养分状况的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1597-1602.

# The Interspecific Water Relations of *Juglans Regia*-Woad/Sickle Senna Agroforestry System in a Hilly Area of Southern Taihangshan Region

HE Chun-xia<sup>1,2</sup>, CHEN Ping<sup>1,3</sup>, ZHANG Jin-song<sup>1,2</sup>, MENG Ping<sup>1,2</sup>, SUN Shou-jia<sup>1,2</sup>, GAO Jun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. Hebei Research Institute of Investigation & Design of Water Conservancy & Hydropower, Tianjin 300250, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of this study is to find out the water relations (competition or facilitation) of various fruit-crop agroforestry systems and to provide theoretical basis for agroforestry configuration in southern Taihangshan region. [Method] In order to quantify the interspecific water relation, the stable carbon isotope technique and the thermal dissipation probe (TDP) method were used to study the water use efficiency (WUE), water consumption and soil water content of component species in a walnut (*Juglans regia*)-woad (*Isatis tinctoria*)/sickle senna (*Senna tora*) agroforestry system. [Result] The results showed that the soil water content of agroforestry system was greater than that of sole walnut, sole woad and sole sickle senna systems, and the sole walnut system had higher soil water content than sole crop systems. The WUE of woad system decreased with their growth, while that of sickle senna system increased with their growth in 2012, but decreased in 2013. The sole walnut and sole woad/sickle senna systems presented a larger water consumption than that in agroforestry system. The water consumption of sole walnut were respectively 1.11 and 1.07 times that of intercropped walnut in 2012 and 2013. The water consumption of sole woad and sole sickle senna systems were 1.83 and 2.26 times that of intercropped woad and intercropped sickle senna in 2012, and 1.96 and 2.60 times in 2013, respectively. Walnut consumed more water than the crops in agroforestry system in 2013, and the water use was equivalent between trees and crops in 2012. Woad and sickle senna in the tree row consumed more water than that at other places (but the water consumption of both the crops was slightly lower than in other places on flowering stage in 2013). The total income of the agroforestry system was respectively 1.49 and 1.24 times that of sole walnut and sole crop systems in 2012, and 1.24 and 1.47 times in 2013. [Conclusion] In these agroforestry systems, walnut improved water condition, and reduced total water consumption comparing to sole woad/sickle senna system. The land equivalent ratio of the agroforestry system achieved to 1.9. Although the production of walnut fruit decreased a little, the total income increased by 1.2 times comparing to sole systems when adding the income of the medicine harvest. It is concluded that walnut-woad/sickle senna intercropping system is suitable at this area.

**Keywords:** agroforestry system; *Juglans regia*; *Isatis tinctoria*; *Senna tora*; stable carbon isotope ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ ); interspecific water relation

(责任编辑: 徐玉秀)