文章编号:1000-7601(2023)06-0190-10 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2023.06.20

不同茬口对高寒阴湿区当归养分吸收特性和药材质量的影响

姜小凤[1,2,4,5],郭凤霞[3],陈 垣[3],郭建国[1]

(1.甘肃省农业科学院旱地农业研究所/植物保护研究所,甘肃 兰州 730070; 2.甘肃省旱作区水资源高效利用重点实验室,甘肃 兰州 730070; 3.甘肃农业大学生命科学技术学院/农学院,甘肃 兰州 730070; 4.农业农村部西北旱地作物绿色低碳重点实验室,甘肃 兰州 730070; 5.部省共建农业农村部旱地作物抗逆增产及雨水高效利用重点实验室,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为建立高效经济的当归生产模式,于 2017—2019 年在甘肃省渭源县设置 5 种作物茬口(T_1:豌豆-小麦-当归,T_2:豌豆-蒙古黄芪-当归,T_3:豌豆-马铃薯-当归,T_4:豌豆-休耕-当归,CK:豌豆-当归-当归)进行田间试验,秋季收获后测定不同茬口当归根、叶养分含量、根活性成分和产量,采用主成分分析法确定各指标权重值、隶属综合因子分析法确定 5 种茬口的综合评价指数。结果表明:T_2处理有利于促进当归根、叶中氮、磷、钾吸收累积,根部氮、磷、钾含量较 CK 分别显著增加 29.98%、32.96%、24.29%($P<0.05$)、叶部氮、磷、钾含量较 CK 分别显著增加 37.72%、42.08%、64.63%($P<0.05$),且该茬口的当归产量、根的阿魏酸、浸出物含量较 CK 分别显著增加19.44%、17.37%、9.54%($P<0.05$)。综合评价指数表现为 $T_2(0.74)>T_4(0.51)>T_1(0.48)>CK(0.29)>T_3(0.25)$。综上可知,豌豆-蒙古黄芪-当归是高寒阴湿区当归高效经济生产的适宜模式。

关键词:当归;茬口;养分吸收;药材质量

中图分类号:S344.6 **文献标志码**:A

Effects of different crop stubbles on nutrients absorption characteristics, yield, and quality of *Angelica sinensis* in alpine and damp areas

JIANG Xiaofeng[1,2,4,5], GUO Fengxia[3], CHEN Yuan[3], GUO Jianguo[1]

(1. *Dryland Agriculture Institute/ Institude of Plant Protection, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*; 2. *Key Laboratory of High Water Utilization on Drvland of Gansu Province, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*; 3. *College of Life Science and Technology /Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*; 4. *Key Laboratory of Low-carbon Green Agriculture in Northwestern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*; 5. *The Jiont Key Laboratory of Agriculture and Rural Affairs-Gansu Province for Crop Drought Resistance, Yield Increment and Rainwater Efficient Utilization on Rain-fed Area, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: The five crop stubbles (T_1: *Pisum sativum-Triticum aestivum-Angelica sinensis*, T_2: *Pisum sativum-Astragalus mongholicus-Angelica sinensis*, T_3: *Pisum sativum-Solanum tuberosum-Angelica sinensis*, T_4: *Pisum sativum*-fallow-*Angelica sinensis*, and CK: *Pisum sativum-Angelica sinensis-Angelica sinensis*) were set up in Zhanpo Village, Lianpeng Town, Weiyuan County, Gansu Province from 2017 and to 2019 in order to establish an efficient and economical production mode for *Angelica sinensis*. The content of root, leaf nutrients, extractive, ferulic acid and yield under five crop stubbles were determined after harvest in autumn. The weight value of each indicator was

收稿日期:2022-10-15 **修回日期**:2022-11-15

基金项目:甘肃省农业科学院农业科技自主创新专项重点研发计划项目(2021 GARS 11);甘肃省科技计划项目:民生科技专项-乡村振兴专题(22CX2NA007);现代丝路寒旱农业科技支撑项目(GSLK-2022-6);鲁甘科技协作计划项目(YDZX2021097);国家重点研发计划课题及子课题项目(2021YFD1100504,2021YFD11005041,2021YFD11005042);国家自然科学基金项目(31460547,31560175,31360317)

作者简介:姜小凤(1974-),女,甘肃平凉人,副研究员,主要从事土壤生态学及药用植物栽培研究。E-mail:jxf_5188@163.com

通信作者:郭凤霞(1963-),女,甘肃定西人,研究员,主要从事中药材育种及栽培研究工作。E-mail:guof@gsau.edu.cn

determined by principal component analysis, and the comprehensive evaluation index of five crop stubbles was determined by comprehensive factor analysis. The results showed that T_2 stubble promoted absorption and accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in root and leaf, and nitrogen, phosphorus, and potassium in root. Under T_2 stubble were significantly increased by 29.98%, 32.96% and 24.29% respectively, compared with CK ($P<0.05$). The nitrogen, phosphorus, and potassium in leave under T_2 stubble were significantly increased by 37.72%, 42.08% and 64.63% respectively, compared with CK ($P<0.05$). The yield of *Angelica sinensis*, the content of ferulic acid and extractive in root under T_2 stubble were significantly increased by 19.44%, 17.37% and 9.54% respectively, compared with CK ($P<0.05$). The comprehensive evaluation index sorted as T2 (0.74) >T_4 (0.51) >T1 (0.48) >CK (0.29) >T3 (0.25). In conclusion, T_2 stubble (*Pisum sativum-Astragalus mongholicus-Angelica sinensis*) was a suitable model for efficient and economic production of *Angelica sinensis* in chilling and humid region of high-elevation area.

Keywords: *Angelica sinensis*; stubble; nutrient absorption; quality of medicinal materials

当归[*Angelica sinensis* (Oliv.) Diels.]为当归属(*Angelica*)多年生药用草本植物,原产于亚州西部,在我国甘肃、云南、陕西、湖北等省份均有栽培,甘肃定西是当归主产地[1-2]。近年来,随着当归广谱药效能力的研究和相关药物的开发,其市场需求量急剧增加,但质量却每况愈下。不同茬口对当归产量和品质影响很大,重茬或连作是限制当归质量提高的重要因素[3]。王田涛[4]研究表明,随着农田连作时间的延长,当归产量和品质逐年下降,与正茬相比较,迎茬、重茬和三茬当归总产量分别下降了10.59%、29.52%和 57.85%,当归优等品的出成率也降低。邱黛玉等[5]研究表明,连作会抑制当归株高增长和干物质积累,降低当归体内抗氧化保护系统和光合参数,进而导致其产量和品质降低。阿魏酸含量是当归品质的主要评价指标之一,阿魏酸含量越高,当归品质越好[6-7]。马中森等[8]研究表明,3 a轮作和重茬处理当归根阿魏酸含量分别为0.155%和0.135%,前者较后者增幅为 14.8%,轮作处理根阿魏酸含量高于 2015 年版《中国药典》规定的含量[2,9]。连作障碍是当归优质高产的核心限制因子[10],连作农田土壤理化性质变劣和化感自毒物质累积是中药材再植障碍的主要原因[11]。因此,寻求既能缓解连作障碍问题,以提高当归产量和品质,又能改善土壤质量,实现用地养地相结合的种植模式迫在眉睫[5,8]。马瑞君等[12]和惠继瑞等[13]研究发现,当归轮作其他作物时,油菜对当归化感作用的敏感性最强、小麦次之,因此,油菜缓解当归连作障碍的效果较好。朱慧等[14]、张新慧等[15]和王田涛等[16]研究表明,当归轮作小麦、当归轮作燕麦和当归轮作蚕豆,均可以缓解当归自毒连作障碍问题。马伟明等[17]、袁洪超等[18]、白刚等[19]和姜小凤等[20]研究发现,休耕 1 季是黑麻土壤用养结合的简便有效方法,道地产区熟地栽培当归后,种植 1 季蒙古黄芪单豆科轮作或种植豌豆、黄芪双豆科轮作再移栽当归,均能有效改善土壤质量,提高土壤肥力,缓解当归连作问题,有利于促进当归幼苗生长发育,提高当归产量和品质,种植作物茬口的改变有助于种植制度合理化,是当归移栽的理想种植模式。

目前,关于当归与其他作物轮作或间作对其产量和质量的影响[21-22],当归与豆科(*Leguminosae*)作物蚕豆(*Vicia faba*)轮作在缓解化感物质自毒的作用[16]等方面研究较多,但全面系统研究不同种植模式对当归养分吸收特性及其经济产量和品质作用机理方面的报道甚少。因此,本试验通过对不同茬口下当归药材产量,根中活性成分含量及根、叶养分含量等指标的变化进行分析研究,阐明不同茬口对当归养分吸收特性和药材质量的作用机理,为当归绿色优质高效科学合理栽培及产业可持续发展提供理论基础和参考依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2017—2019 年在甘肃省定西市渭源县莲蓬镇绽坡村甘肃农业大学试验点(35°13′N,104°22′E,海拔 2 100 m)进行,该区是当归传统的道地产区,日照充足,年日照时数为 2 406~2 822 h;山地气候高寒阴湿,降水较多,年均气温 5.7℃,年均降水量约 556 mm,全年无霜期约 165 d。土壤质地为黑麻土。

1.2　田间试验设计

2017 年 4 月 20 日播种豌豆('陇碗 2 号')均一化平衡土壤肥力。2018 年播种前,按"S"取样法,管型土钻随机钻取 0~20 cm 土层土壤样品,混匀测定土壤理化性质,有机质含量为 20.01 g·kg^{-1},全氮含

量为1.30 g·kg^{-1},全磷含量为0.90 g·kg^{-1},全钾含量为22.88 g·kg^{-1},碱解氮含量为69.58 mg·kg^{-1},速效磷含量为25.08 mg·kg^{-1},速效钾含量为181.45 mg·kg^{-1},pH为8.23。试验为单因素随机区组设计,分别于2018年3月25日撒播春小麦('陇春10号'),4月25日穴播马铃薯('大西洋')、5月4日沟播蒙古黄芪和当归('岷归1号'),休耕一季为对照;春小麦于7月15日收获,马铃薯于9月25日收获,蒙古黄芪于10月20日采挖,当归于11月5日采挖。2019年4月10日,选用大小一致的当归苗移栽于上述培育的茬口小区,播种密度为12 000株·667m^{-2},构成豌豆-春小麦-当归(T_1)、豌豆-蒙古黄芪-当归(T_2)、豌豆-马铃薯-当归(T_3)、豌豆-休耕-当归(T_4)、豌豆-当归-当归(CK)5个种植模式处理。试验小区面积6.0 m^2(3.0 m×2.0 m),小区间距0.5 m,重复3次,共15个小区。前茬作物全生育期不施肥且不灌溉;当归移栽前各小区分别均匀施入3 kg史丹利复合肥($N+P_2O_5+K_2O=45\%$),生育期人工除草,不喷施农药,其余管理同当地大田,当归于2019年11月2日收获,其生长季平均降雨量为520 mm。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 *当归根鲜质量、单根质量、叶干质量及含水量的测定* 收获时每个处理随机选取9株无病当归根样品,用百分之一的天平称重后,计算其平均值即为各处理当归单根鲜质量;将每处理小区的全部当归叶收获,晾干至恒重后分别称重,即为叶干质量;收获时每处理小区随机选取3株当归的根称重,记为根鲜质量,105℃杀青30 min后,在鼓风干燥箱60℃烘干至恒重称重,记为根干质量,根干质量平均值即为单根质量。

根鲜质量含水量(%)=样品根干质量/样品根鲜质量×100%

1.3.2 *当归根活性成分的测定* 收获根样品测定干质量后,取样研磨,采用酚-硫酸比色法测定根多糖含量,采用热浸法测定浸出物含量,阿魏酸含量参照高效液相色谱法进行测定[23]。

1.3.3 *当归叶和根养分含量的测定* 收获样品测定干质量后,分别取样研磨消煮,测定根和叶N、P、K养分含量,全氮采用凯氏定氮法(FOSS-全自动定氮仪)测定,全磷采用钒钼黄比色法(TU-1901双光束紫外可见分光光度计)测定,全钾采用火焰光度计法(Sherwood M410型火焰光度计)测定[24]。养分累积量的计算公式如下:

氮累积量(kg·hm^{-2})=根(叶)全氮含量×根(叶)单位面积干物质量/100

磷累积量(kg·hm^{-2})=根(叶)全磷含量×根(叶)单位面积干物质量/100

钾累积量(kg·hm^{-2})=根(叶)全钾含量×根(叶)单位面积干物质量/100

1.3.4 *当归根重金属含量的测定* 收获样品测定干质量后,根样品采用混酸(硝酸、盐酸、氢氟酸以6∶3∶2的比例混合)在微波消解仪(MASTER-40)消解,利用ICP-5000电感耦合等离子体发射光谱仪测定样品中的Cd、Cr和Pb含量,采用AFS-2100型原子荧光仪测定Hg、As元素的含量。

1.3.5 *当归生长指标及产量测定* 收获时每小区选取具有代表性的9株当归,用钢卷尺测定其主根长(主根的长度)、芦头长(芦头顶端到主根直径最大处的长度);用游标卡尺测定芦头直径(距离芦头顶端2 mm处的直径);计数法测定侧根数(主根上直径大于2 mm的一级侧根数)。将各处理小区的全部当归根收获,晾干至恒重后分别称重,折算成公顷产量,其计算公式为:

当归产量(kg·hm^{-2})=小区当归产量/6×667×15。

1.4 数据处理

采用DPS V7.5软件Duncan's新复极差检验法进行差异显著性分析,Excel 2010制图,SPSS 19.0统计软件进行主成分分析,主成分分析数据处理公式如下:

对当归休耕和种植作物的综合评价参照DURIS等[25]、刘文博等[26]的方法分析,采用SPASS(分析-降维-因子分析)软件在主成分分析基础上提取初始特征根大于1的各指标主成分值,计算其权重(W_j),根据相关性质计算正反隶属函数值,最后估算综合指数(Comprehensive index,CI)。

$$W_j=\sum(C_{l,j}\times VP_l)/\sum\sum(C_{l,j}\times VP_l)$$

$$R(X_{ij})=(X_{ij}-X_{j\max})/(X_{j\max}-X_{j\min})$$

$$R_R(X_{ij})=1-(X_{ij}-X_{j\min})/(X_{j\max}-X_{j\min})$$

$$CI_j=\sum[R(X_{ij})\times W_j]$$

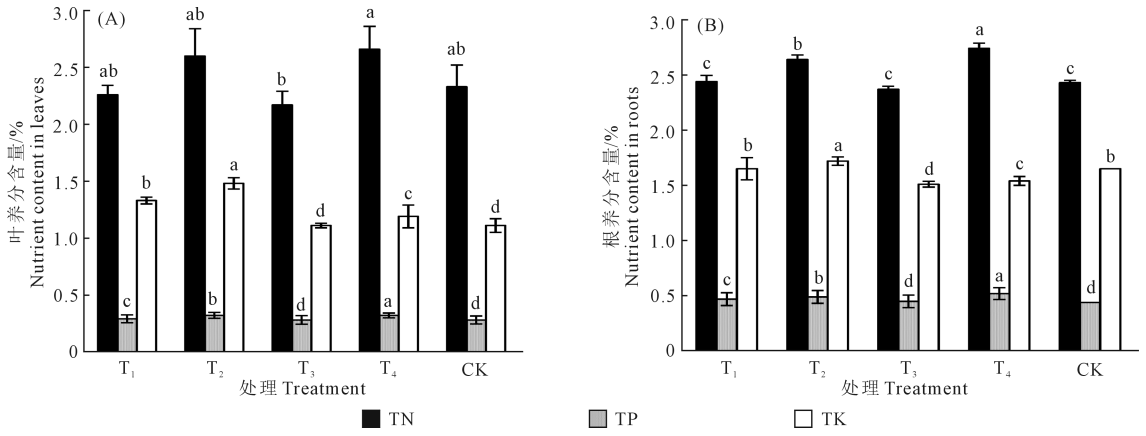
式中,W_j表示第j个指标的权重值,$C_{l,j}$表示第j个指标的第l主成分值,VP_l表示第l主成分方差的百分率;i表示不同茬口,j表示测定指标,$R(X_{ij})$表示i茬口j指标的隶属函数值,$R_R(X_{ij})$表示i茬口j指标的反隶属函数值,X_{ij}表示i茬口j指标的平均观测值,$X_{j\min}$表示所有茬口j指标的最小值,$X_{j\max}$表示所有茬口j指标的最大值;CI_j为第i茬口j个指标的累计综合指数。

2　结果与分析

2.1　不同茬口对当归叶、根养分含量及品质的影响

2.1.1　对当归叶及根养分含量的影响　氮、磷、钾是植物生长发育的必需营养元素。如图 1A 所示,5 种处理下 T_4和 T_2处理当归叶全氮含量较高、T_1和 T_3处理次之,各处理均与 CK 差异不显著;当归叶全磷含量 T_2和 T_4处理较高、T_1处理居中、T_3处理次之,T_4、T_2、T_1处理分别较 CK 显著增加 14.29%、14.28%、3.57%;T_2和 T_1处理当归叶全钾含量较高、T_4处理居中、T_3处理次之,T_2、T_1、T_4处理分别较 CK 显著增加 33.33%、19.82%、7.21%($P<0.05$)。如图 1B 所示,当归根全氮和全磷含量均表现为 T_4和 T_2处理显著高于其他处理、T_1处理居中、T_3处理次之,T_2、T_4处理根全氮含量较 CK 分别显著增加 8.64%、12.76%($P<0.05$),T_1、T_2、T_4处理根全磷含量较 CK 分别显著增加 6.82%、11.36%、18.18%($P<0.05$);T_2和 T_1处理当归根全钾含量较高,与 CK 相比,T_2处理全钾含量显著增加 4.24%($P<0.05$),T_3和 T_4处理分别显著降低 8.48%和 6.67%($P<0.05$)。

2.1.2　对当归叶及根养分累积量的影响　如图 2A 所示,T_2、T_4处理当归叶氮、磷养分累积量较高、T_1处理居中、T_3处理次之,T_2、T_4、T_1处理氮累积量较 CK 分别增加 37.72%、26.33%($P<0.05$)、4.14%;T_2、T_4、T_1、T_3处理磷累积量分别较 CK 显著增加 42.08%、30.42%、12.08%、6.67%($P<0.05$)。T_2和 T_1处理叶钾养分累积量较高、T_4处理居中、T_3处理次之,T_2、T_1、T_4处理分别较 CK 显著增加 64.63%、28.54%、18.92%($P<0.05$)。如图 2B 所示,T_2和 T_4处理当归根氮和磷累积量较高、T_1处理居中、T_3处理次之,T_2、T_4、T_1处理氮和磷累积量较 CK 增幅分别为 29.98%、19.56%、9.07%和 32.96%、25.13%、15.68%,各处理

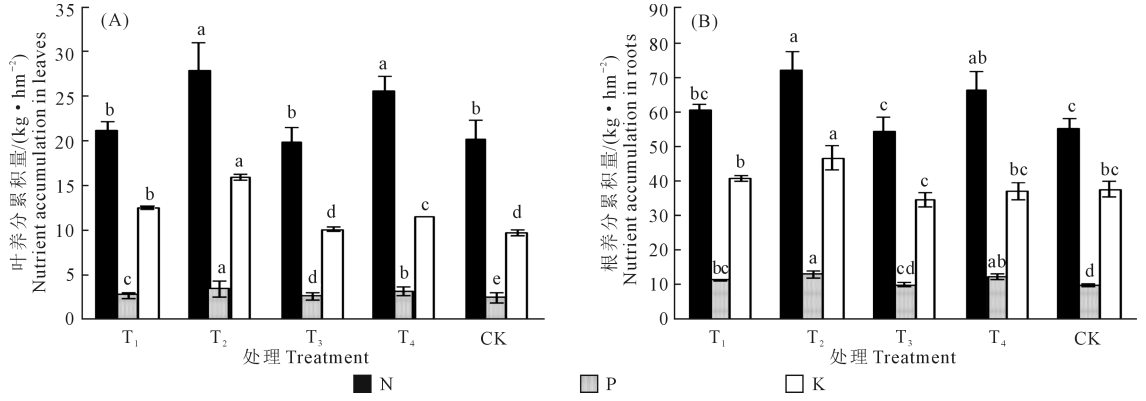


注:TN:全氮含量;TP:全磷含量;TK:全钾含量。小写字母为 $P<0.05$ 水平的差异显著性。

Note: TN: The content of total nitrogen; TP: The content of total phosphorus; TK: The content of total potassium. The lowercase letter is significance of difference at $P<0.05$ level.

图 1　不同处理对当归叶和根养分含量的影响

Fig.1　Effects of different treatments on nutrient content in leaves and roots of *Angelica sinensis*



注:N:氮累积量;P:磷累积量;K:钾累积量。小写字母为 $P<0.05$ 水平的差异显著性。

Note: N: The accumulation quantity of nitrogen; P: The accumulation quantity of phosphorus; K: The accumulation quantity of potassium. The lowercase letter is significance of difference at $P<0.05$ level.

图 2　不同处理对当归叶和根养分累积量的影响

Fig.2　Effects of different treatments on nutrient accumulation in leaves and roots of *Angelica sinensis*

增加显著（$P<0.05$）。T_2和 T_1处理当归根钾累积量较高、T_4和 T_3处理次之，T_2、T_1处理根钾累积量较 CK 分别显著增加 24.29%、8.25%（$P<0.05$）。

2.1.3 对当归根活性成分的影响 如图 3A 所示，T_2和 T_4处理当归根多糖含量高于其他处理，但处理之间差异不显著（$P>0.05$）；根阿魏酸含量表现为 T_2和 T_4处理较高、T_1处理居中、T_3处理次之，T_2、T_4处理分别较 CK 显著增加 17.37%、13.62%（$P<0.05$）（图 3B）；根浸出物含量 T_1、T_2处理较高、T_4处理居中、T_3处理次之，T_1、T_2处理较 CK 分别显著增加 6.12%、9.54%（$P<0.05$）（图 3C）。

2.2 不同茬口对当归根重金属含量的影响

如图 4A 所示，与 CK 相比，T_2、T_3处理当归根 Cd 含量分别显著增加 30.54%、24.14%（$P<0.05$），T_1和 T_4处理与 CK 差异不显著（$P>0.05$）；T_1、T_2处理根 Cr 含量较 CK 分别显著降低 23.89%、16.71%（$P<0.05$），T_3、T_4处理与 CK 差异不显著（$P>0.05$）（图 4B）；T_1、T_2、T_3处理根 As 含量较 CK 分别显著增加了 13.13%、14.53%、9.50%（$P<0.05$），T_4处理与 CK 差异不显著（$P>0.05$）（图 4D）；5 种处理方式下根 Pb 和 Hg 含量均与 CK 差异不显著（$P>0.05$）（图 4C、E）。各处理在不同指标中表现有所不同，但其当归根中重金属 Cd、Cr、Pb、Hg 和 As 含量均符合《药用植物及制剂进出口绿色行业标准》中规定的重金属残留限量[27]。

2.3 不同茬口对当归产量指标的影响

表 1 表明，各处理对当归产量指标（芦头直径、芦头长、>2 mm 侧根数、单根鲜质量）都有一定影响，但对主根长作用不显著。T_2和 T_4处理芦头直径较大、T_1处理居中、T_3处理次之，T_2、T_4、T_1处理较 CK 分

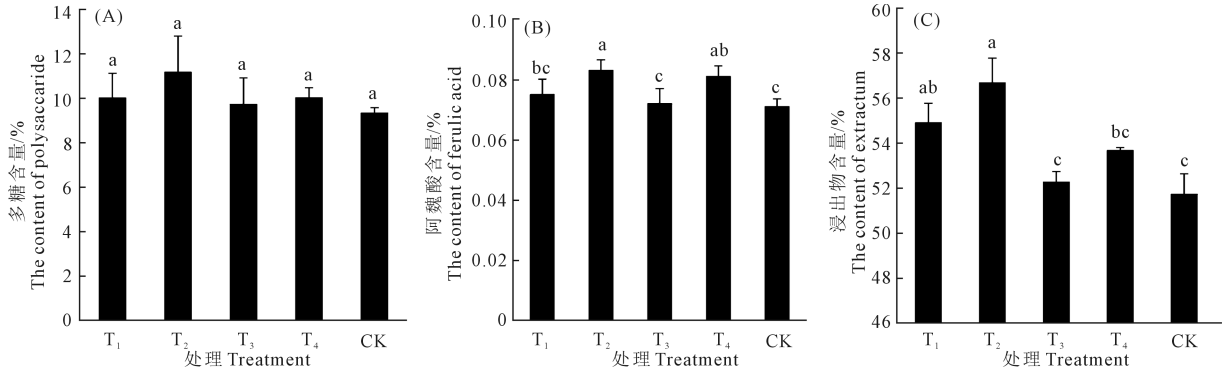


图 3 不同处理对当归根活性成分的的影响

Fig.3 Effects of different treatments on the contents of active ingredients in roots of *Angelica sinensis*

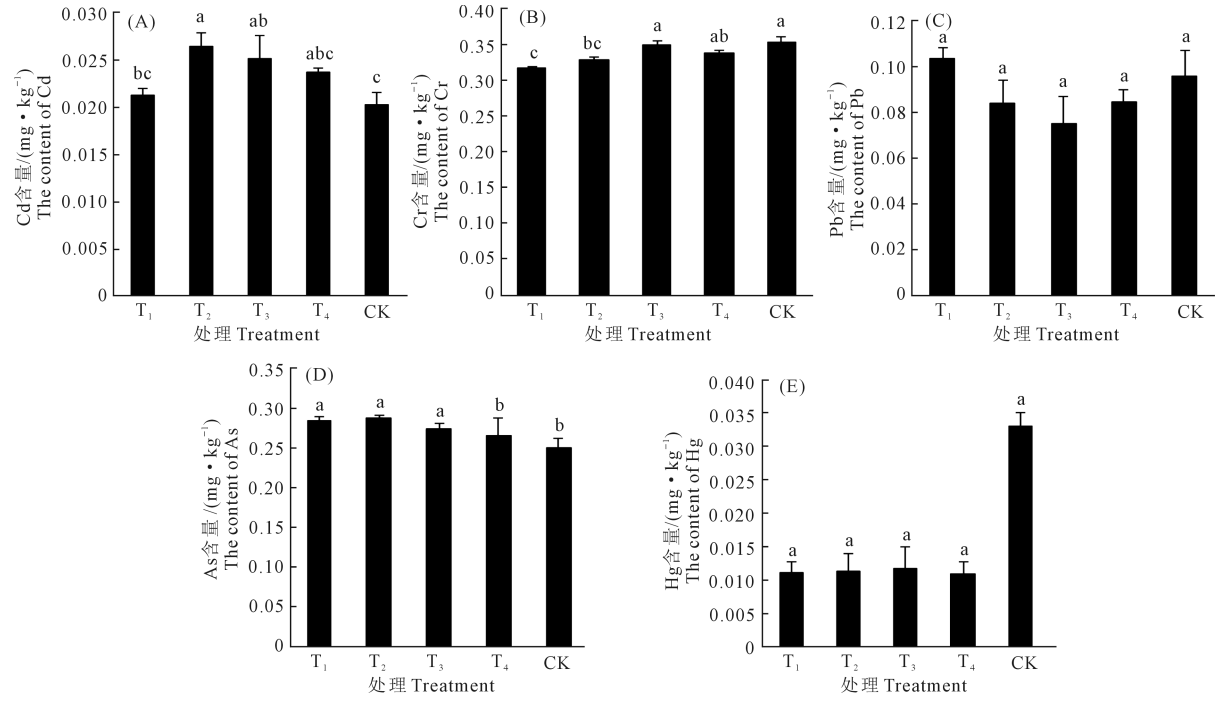


图 4 不同处理对当归根重金属含量的影响

Fig.4 Effects of different treatments on the contents of heavy metal in roots of *Angelica sinensis*

别增加 25.77%（$P<0.05$）、18.05%、17.05%；T_2 和 T_4 处理芦头长较长、T_1 处理居中、CK 和 T_3 处理次之，T_4、T_2 处理较 CK 分别增加 21.27%（$P<0.05$）、7.30%。T_1 和 CK 处理侧根数（>2mm）较高、T_3 处理居中、T_2 和 T_4 处理次之，T_1 处理较 CK 增加 42.86%（$P>0.05$）。T_2 和 T_1 处理单根鲜质量较高、T_4 处理居中、T_3 和 CK 次之，T_2、T_1、T_4 处理较 CK 分别增加 13.85%、8.63%、3.82%，T_1 和 T_2 处理增加显著（$P<0.05$）。T_2 和 T_1 处理药材产量较高、T_4 处理居中、T_3 处理次之，T_2、T_1、T_4 处理较 CK 分别增加 19.44%（$P<0.05$）、8.42%、6.10%。T_4 和 T_1 处理药材鲜质量含水量较高、T_2 处理居中、T_3 处理次之，T_4、T_1、T_2、T_3 处理较 CK 分别增加 17.51%（$P<0.05$）、8.59%（$P<0.05$）、7.57%、7.13%；T_2 和 T_4 处理叶干质量较大、T_1 处理居中、T3 和 CK 次之，T_2、T_4、T_1、T_3 处理较 CK 处理分别显著增加 23.21%、10.63%、7.23%、4.73%（$P<0.05$）；T_2 和 T_4 处理单根质量较大、T_3 处理居中、T_1 处理次之，T_2 处理较 CK 显著增加 7.42%（$P<0.05$），T_4、T_3、T_1 处理较 CK 分别增加 2.21%、1.31%、0.32%（$P>0.05$）。

2.4　当归产量指标、叶和根养分含量及品质的主成分回归分析

对当归采挖后产量、叶和根养分含量及品质构成在内的 23 个因子降维分析，提取成分主因子 PC_1～PC_6 中大于 1 的特征值进行综合评价，计算各主成分因子得分及综合得分，并对综合得分进行排序，确定最佳的种植模式。如表 2 所示，各主成分方差贡献率分别为 41.05%、16.65%、9.60%、7.95%、6.31%、4.62%，23 个因子方差累积贡献率达到了 86.18%，表明 6 个主成分因子代表了当归采挖后经济产量、叶和根养分含量及品质的绝大部分信息。

利用模糊评价函数里的隶属度对产量、叶和根养分含量及品质构成在内的 23 个因子进行评价，是对受多种因素影响的当归种植模式做出全面评价的有效多因素决策方法，在本研究中将与其相关联的各个指标赋以比例值，比例值的取值区间为 0～1，隶属函数值越接近于 1 表示该因子属于整体的程度越高，越接近于 0 表示该因子属于整体的程度越低。权重值是指某一指标在整体评价中的相对重要程度[28]。如表 3 所示，本研究各处理方式下当归产量构成因子、叶和根养分含量及品质主成分指标隶属函数值与权重值进行综合分析，综合评价指数排序为 $T_2>T_4>T_1>CK>T_3$，T_2 和 T_4 模式综合指数分别为 0.74 和 0.51，表明适宜当归的最佳种植模式为豌豆-蒙古黄芪-当归，豌豆-休耕-当归和豌豆-春小麦-当归次之。

3　讨论

3.1　不同茬口对当归养分含量及品质的影响

氮、磷、钾等是作物生长所需的主要营养元素，N 和 P 共同参与植物生命体构建[29-30]。不同茬口对当归养分含量、品质的影响不同。研究发现，黄芪茬口种植当归的挥发油含量、阿魏酸、多糖和藁苯内酯含量明显高于其他茬口，小麦茬口的浸出物含量显著高于其他茬口[31]；蚕豆茬口有利于促进当归根茎活性物质的积累以及抗氧化能力的提高，可作为当归大面积种植栽培的首选茬口[32]；小麦、黄芪茬口能明显降低当归灰分和酸不溶性灰分含量，提高当归浸出物、挥发油和阿魏酸含量[11]。白刚[33]、金彦博[34]研究也表明，熟地黄芪茬口更有利于当归有效成分的积累。休耕后的农田土壤，系统由原来的开放性养分循环转变为相对封闭的循环结构[35]，不仅减少了土壤养分流失，还能向农田土壤返回营养物质，促使养分表聚，提升表层土壤养分含量。前茬作物不同是影响土壤质量演化的因素之一。豆科作物与粮食作物轮作倒茬有利于促进

表 1　不同茬口对当归产量指标的影响

Table 1　Effects of different crop stubbles on yield index of *Angelica sinensis*

处理 Treatment	主根长 Main root length /cm	芦头直径 Reed head diameter /mm	芦头长 Reed head diameter /cm	侧根数（>2 mm）Lateral root number（>2 mm）	单根鲜质量 Single root fresh weight /g	产量 Yield /(kg·hm^{-2})	根鲜质量含水量 Fresh weight water content in root/%	叶干质量 The dry weightin leaves /(kg·hm^{-2})	单根质量 Single root weight/g
T_1	23.45±2.25a	19.84±4.80ab	3.15±0.24b	10.00±4.29a	45.82±2.93ab	2471±50ab	65.37±0.39b	934.85±13.31bc	14.21±0.27b
T_2	24.42±5.99a	21.32±1.28a	3.38±0.66ab	6.00±4.17ab	48.02±1.99a	2722±196a	64.76±0.56b	1074.15±23.45a	15.24±0.20a
T_3	22.98±6.68a	18.56±3.26ab	3.07±0.27b	6.00±1.63ab	42.90±4.92bc	2301±147b	64.49±1.23b	913.05±25.58c	14.37±0.34b
T_4	20.38±5.93a	20.01±0.99ab	3.82±0.40a	4.00±2.37b	43.79±1.69bc	2418±158b	70.74±1.29a	964.45±13.08b	14.49±0.19b
CK	23.98±6.28a	16.95±4.57b	3.15±0.82b	7.00±4.76ab	42.18±1.66c	2279±112b	60.20±0.17c	871.80±25.10d	14.18±0.32b

注：小写字母代表 $P<0.05$ 水平的差异显著性。

Note: The lowercase letters indicate significance of difference at $P<0.05$ level.

表2 不同茬口对当归养分指标、产量指标、品质指标构成因子成分矩阵及权重表

Table 2 Component matrix and weight table of the nutrient indexes, yield and quality indexes of *Angelica sinensis* under different crop stubbles

项目 Item	主成分析矩阵 Principal component analysis matrix						权重值 Weight value
	1	2	3	4	5	6	
叶全氮含量 Total nitrogen content in leaves	0.1470	0.0105	0.0291	0.0253	0.0107	0.0190	0.0447
叶全磷含量 Total phosphorus content in leaves	0.1676	0.0030	0.0078	0.0082	0.0033	0.0077	0.0365
叶全钾含量 Total potassium content in leaves	0.2170	0.0001	0.0035	0.0011	0.0038	0.0044	0.0425
根全氮含量 Total nitrogen content in roots	0.1770	0.0197	0.0098	0.0243	0.0095	0.0037	0.0451
根全磷含量 Total phosphorus content in roots	0.2006	0.0044	0.0056	0.0005	0.0140	0.0029	0.0421
根全钾含量 Total potassium content in roots	0.3064	0.0236	0.0103	0.0334	0.0035	0.0021	0.0701
根多糖含量 Polysaccharide content in roots	0.0772	0.0554	0.0268	0.0065	0.0279	0.0019	0.0362
根浸出物含量 Extract content in roots	0.1602	0.0031	0.0082	0.0153	0.0070	0.0014	0.0361
根阿魏酸含量 Ferulic acid content in roots	0.0454	0.0449	0.0044	0.0004	0.0014	0.0010	0.0180
芦头直径 Reed head diameter	0.0616	0.0456	0.0127	0.0130	0.0204	0.0008	0.0285
单根质量 Single root weight	0.2026	0.0174	0.0088	0.0017	0.0004	0.0005	0.0428
侧根数(>2mm) Lateral root number	0.1680	0.0284	0.0681	0.0227	0.0176	0.0003	0.0564
主根长 Main root length	0.2485	0.0808	0.0095	0.0388	0.0091	0.0002	0.0715
芦头长 Reed head length	0.1929	0.0268	0.0554	0.0178	0.0132	0.0001	0.0566
单根鲜质量 Single root fresh weight	0.1162	0.0088	0.0126	0.0058	0.0191	0.0000	0.0300
产量 Yield	0.1717	0.0138	0.0249	0.0144	0.0123	0.0000	0.0438
根鲜质量含水量 Fresh weight water content in roots	0.2590	0.0049	0.0012	0.0256	0.0134	0.0000	0.0562
叶干质量 The dry weight in leaves	0.0709	0.0095	0.0077	0.0142	0.0119	0.0000	0.0211
根 Cd 含量 The content of cadmium in roots	0.0206	0.1175	0.0453	0.0018	0.0109	0.0000	0.0362
根 Cr 含量 The content of chromium in roots	0.1679	0.0466	0.0065	0.0208	0.0219	0.0000	0.0487
根 Pb 含量 The content of plumbum in roots	0.0790	0.1421	0.0081	0.0061	0.0173	0.0000	0.0467
根 As 含量 The content of arsenic in roots	0.1526	0.0234	0.0249	0.0467	0.0150	0.0000	0.0485
根 Hg 含量 The content of mercury in roots	0.0642	0.0868	0.0571	0.0145	0.0031	0.0000	0.0417
初始特征值 Initial Eigenvalues	9.4412	3.8296	2.2094	1.8283	1.4502	1.0624	
主成分方差贡献率 Principal component variance contribution rate/%	41.0487	16.6505	9.6063	7.9493	6.3052	4.6193	
主成分累计贡献率 Cumulative contribution rate of principal components/%	41.0487	57.6992	67.3055	75.2549	81.5600	86.1794	

表3 不同茬口对当归养分指标、产量指标、品质指标构成因子成分综合指数及排名得分表

Table 3 Comprehensive index and ranking score of the nutrient indexes, yield and quality indexes of *Angelica sinensis* under different crop stubbles

项目 Item	指数 Index				
	T_1	T_2	T_3	T_4	CK
叶全氮含量 Total nitrogen content in leaves	0.0079	0.0390	0.0000	0.0447	0.0139
叶全磷含 Total phosphorus content in leaves	0.0089	0.0308	0.0037	0.0365	0.0000
叶全钾含量 Total potassium content in leaves	0.0253	0.0425	0.0000	0.0097	0.0003
根全氮含量 Total nitrogen content in roots	0.0090	0.0336	0.0000	0.0451	0.0072
根全磷含量 Total phosphorus content in roots	0.0156	0.0265	0.0047	0.0421	0.0000
根全钾含量 Total potassium content in roots	0.0468	0.0701	0.0000	0.0099	0.0477
根多糖含量 Polysaccharide content in roots	0.0134	0.0362	0.0076	0.0135	0.0000
根浸出物含量 Extract content in roots	0.0232	0.0361	0.0039	0.0141	0.0000
根阿魏酸含量 Ferulic acid content in roots	0.0054	0.0180	0.0015	0.0141	0.0000
芦头直径 Reed head diameter	0.0188	0.0285	0.0105	0.0199	0.0000
单根质量 Single root weight	0.0267	0.0428	0.0053	0.0118	0.0000
侧根数(>2 mm) Lateral root number	0.0564	0.0152	0.0209	0.0000	0.0233
主根长 Main root length	0.0545	0.0715	0.0460	0.0000	0.0638
芦头长 Reed head length	0.0052	0.0238	0.0000	0.0566	0.0054
单根鲜质量 Single root fresh weight	0.0166	0.0235	0.0089	0.0300	0.0000
产量 Yield	0.0190	0.0438	0.0022	0.0137	0.0000
根鲜质量含水量 Fresh weight water content in roots	0.0276	0.0244	0.0229	0.0562	0.0000
叶干质量 The dry weight in leaves	0.0066	0.0211	0.0043	0.0097	0.0000
根 Cd 含量 The content of cadmium in roots	0.0061	0.0362	0.0287	0.0202	0.0000
根 Cr 含量 The content of chromium in roots	0.0000	0.0147	0.0430	0.0286	0.0487
根 Pb 含量 The content of plumbum in roots	0.0467	0.0143	0.0000	0.0153	0.0342
根 As 含量 The content of arsenic in roots	0.0439	0.0485	0.0317	0.0200	0.0000
根 Hg 含量 The content of t mercury in roots	0.0006	0.0009	0.0018	0.0000	0.0417
综合指数 Comprehensive index	0.4839	0.7420	0.2475	0.5117	0.2862
综合排序 Comprehensive ranking	3	1	5	2	4

土壤养分提升,提高土壤可持续生产力[36]。本研究发现,T_2(豌豆-蒙古黄芪-当归)和 T_4(豌豆-休耕-当归)处理有利于氮、磷养分累积及当归次生代谢产物阿魏酸、多糖和浸出物合成,这主要是由于 T_2(豌豆-蒙古黄芪-当归)处理为双豆(豌豆-黄芪)轮作模式,根系自身固氮效应在土壤中累积较多的氮,使土壤肥力提高,植株养分积累增加,进而促进当归健康旺盛生长,同时侧根增多和增长,并在韧皮部合成和积累更多的阿魏酸,使药材品质提升;T_4(豌豆-休耕-当归)处理是用养结合的种植措施,能有效培肥地力,提高土壤质量,有利于当归养分的累积及品质提升,这一结果和王秀芬等[37]、薛萐等[35]的研究结果相似。本研究还发现,T_3(豌豆-马铃薯-当归)处理养分含量及其累积量低于 CK 处理,其主要原因可能是前茬马铃薯对养分的吸收利用较多,导致土壤中残留养分减少,因此后茬当归中养分含量及累积量相对减少,这一结果与张新慧等[31]、白刚等[38]的研究结论相似。

3.2　不同茬口对当归药材产量指标的影响

已有研究表明,作物茬口、土壤特性、海拔高度、气象因子是影响作物经济产量和品质的重要因素[39],合理的种植茬口有利于降低土壤容重、改善土壤理化特性和土壤生态环境,既能促进根系发育又能促进药用植物有效成分的积累,还能为其生长发育提供所需的水分和养分,进而提高作物产量和品质[40]。有研究表明,与花生、玉米连作处理相比,花生-玉米-甘薯轮作模式下玉米籽粒产量和生物量最高[41]。在冬小麦连作和一年龄紫花苜蓿-冬小麦轮作系统中,轮作冬小麦产量较连作提高 9.4%[42]。本研究发现,T_2(豌豆-蒙古黄芪-当归轮作)当归产量显著高于其他处理,可能是因为豌豆、黄芪均是豆科植物,自身固氮作用使双豆轮作系列下当归产量提高幅度较大,而且下茬作物生长旺盛时该茬口下土壤中的氮素分解转化为作物能够易于吸收的氮肥,保证当归吸收足够的养分,使其芦头直径、主根长和单根鲜质量高于其他处理,产量也随之显著增加[39]。此外,该种植模式对芦头直径、芦头长、侧根数(>2 mm)、单根质量都有显著作用,这与刘莉莉[43]、李国业等[44]的蚕豆与当归轮作模式下当归茎粗、根长、芦头长、单根质量及产量较当归连作显著增加的研究结果一致。

各处理方式下当归品质指标及产量指标、叶和根养分含量及养分累积量的主成分分析结合隶属度综合分析表明,当归种植模式表现为 $T_2(0.74)>T_4(0.51)>T_1(0.48)>CK(0.29)>T_3(0.25)$。因此,适宜甘肃道地产区当归的种植模式为豌豆-蒙古黄芪-当归,豌豆-休耕-当归和豌豆-春小麦-当归模式次之,可为当归优质高效栽培及可持续生产提供技术支撑。

4　结　论

1)当归采挖后植株养分累积量及其多糖、阿魏酸、浸出物含量均为 T_2(豌豆-蒙古黄芪-当归)处理较高; T_2(豌豆-蒙古黄芪-当归)和 T_4(豌豆-休耕-当归)处理有利于当归叶和根对 N 和 P 吸收和累积,T_2(豌豆-蒙古黄芪-当归)和 T_1(豌豆-小麦-当归)处理有利于当归叶和根对 K 的吸收和累积。

2)当归根中不同重金属(Cd、Cr、Pb、Hg 和 As)含量处理间变化规律有所不同,但均符合《药用植物及制剂进出口绿色行业标准》中规定的重金属残留限量。

3)T_2(豌豆-蒙古黄芪-当归)处理单根鲜重和药材经济产量均较高,其单根鲜质量较 CK(豌豆-当归-当归)处理显著增加了 13.85%,药材产量较 CK 显著增加了 19.44%;当归收获后 23 个指标综合评价指数大小排序为 $T_2(0.74)>T_4(0.51)>T_1(0.48)>CK(0.29)>T_3(0.25)$。表明 T_2(豌豆-蒙古黄芪-当归)模式可作为甘肃道地当归绿色优质高产推荐栽培方式。

参 考 文 献:

[1] 谢成科, 岳松建. 药用植物学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1988.
XIE C K, YUE S J. Medical botany[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 1988.

[2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典 2015 年版 (一部)[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015: 89.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's republic of China 2015 (Volume I)[M]. Beijing: China Medical Science Press, 2015: 89.

[3] 姜小凤, 郭凤霞, 陈垣, 等. 种植模式对当归根际细菌群落多样性及代谢通路的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4254-4262.
JIANG X F, GUO F X, CHEN Y, et al. Effect of cropping patterns on bacterial community diversity and metabolic function in rhizo-sphere soil of *Angelica sinensis*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(12): 4254-4262.

[4] 王田涛. 间套种植对当归连作障碍的修复机理[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
WANG T T. Remediation mechanisms of intercropping patterns on continuous cropping obstacle of *Angelica sinensis*[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013.

[5] 邱黛玉, 沈鹏瑞, 张磊, 等. 大蒜对膜侧栽培当归连作、轮作土壤环境及产量的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(3): 156-162.
QIU D Y, SHEN P R, ZHANG L, et al. Effect of garlic on soil envi-

ronment and yield of continuous cropping and rotation of *Angelica sinensis under membrane cultivation*[J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulæ*, 2021, 27(3): 156-162.

[6] 陈琳, 朱靖, 王嵩, 等. 当归主要活性成分提取方法及其活性研究进展[J]. 上海医药, 2021, 42(9): 71-75.
CHEN L, ZHU J, WANG S, et al. The research progress in the methods for the extraction of the medicinal ingredients from *Angelica sinensis* and their activity[J]. Shanghai Medical and Pharmaceutical Journal, 2021, 42(9): 71-75.

[7] SOWNDHARARAJAN K, DEEPA P, KIM M, et al. A review of the composition of the essential oils and biological activities of *Angelica species*[J]. Scientia Pharmaceutica, 2017, 85(3): 33.

[8] 马中森, 洪建雄, 刘效瑞, 等. 轮作周期及新型肥料对当归抗病性、产量及品质的影响[J]. 中药材, 2019, 42(12): 2759-2763.
MA Z S, HONG J X, LIU X R, et al. Effects of rotation cycle and new fertilizer on disease resistance, yield and quality of *Angelica sinensis*[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2019, 42(12): 2759-2763.

[9] ALI M, ABBASI B H, AHMAD N, et al. Sucrose-enhanced biosynthesis of medicinally important antioxidant secondary metabolites in cell suspension cultures of *Artemisia absinthium* L.[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2016, 39(12): 1945-1954.

[10] XIN A Y, LI X Z, JIN H, et al. The accumulation of reactive oxygen species in root tips caused by autotoxic allelochemicals-a significant factor for replant problem of *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 138: 111432.

[11] 邱黛玉, 杜毛笑, 巫蓉, 等. 连作障碍对党参根际土壤微环境的影响[J]. 中国野生植物资源, 2022, 41(5): 12-17, 22.
QIU D Y, DU M X, WU R, et al. Effects of continuous cropping on nutrient and enzyme activity in rhizosphere soil of *Codonopsis pilosula*[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2022, 41(5): 12-17, 22.

[12] 马瑞君, 惠继瑞, 朱慧, 等. 当归营养期的化感作用[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1483-1488.
MA R J, HUI J R, ZHU H, et al. Allelopathy of *Angelica sinensis* at vegetative stage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(6): 1483-1488.

[13] 惠继瑞, 李晶, 赵庆芳, 等. 当归不同发育期自毒作用研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(2): 605-607, 611.
HUI J R, LI J, ZHAO Q F, et al. Study on autotoxicity of *Angelica sinensis* (Oilv.) Diels in different development stages[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2008, 36(2): 605-607, 611.

[14] 朱慧, 马瑞君, 吴双桃, 等. 当归根际土对其种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(5): 833-838.
ZHU H, MA R J, WU S T, et al. Effects of *Angelica sinensis* rhizosphere soil on *A. sinensis* seed germination and seedling growth[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(5): 833-838.

[15] 张新慧, 郎多勇, 张恩和. 当归根际土壤水浸液的自毒作用研究及化感物质的鉴定[J]. 中草药, 2010, 41(12): 2063-2066.
ZHANG X H, LANG D Y, ZHANG E H. Autotoxicity of water extracts from rhizosphere soil of cultivated *Angelica sinensis* and identification of their allelopathic compounds[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2010, 41(12): 2063-2066.

[16] 王田涛, 王琦, 王惠珍, 等. 当归自毒作用和其对不同作物的化感效应[J]. 草地学报, 2012, 20(6): 1132-1138.
WANG T T, WANG Q, WANG H Z, et al. Autotoxicity of *Angelica sinensis* and allelopathy on tested plants[J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(6): 1132-1138.

[17] 马伟明, 郭凤霞, 陈垣, 等. 在不同茬口土地上的当归育苗研究[J]. 中国中药杂志, 2009, 34(5): 552-553.
MA W M, GUO F X, CHEN Y, et al. Study on the seedling raising of *Angelica sinensis* in different stubble land[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2009, 34(5): 552-553.

[18] 袁洪超, 郭凤霞, 陈垣, 等. 高寒区轮作模式对当归田土壤特性及药材产量的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(10): 183-193.
YUAN H C, GUO F X, CHEN Y, et al. Effect of crop rotation patterns on field soil properties and medicinal material yield for *Angelicae sinensis* in alpine regions[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(10): 183-193.

[19] 白刚, 郭凤霞, 陈垣, 等. 岷县生荒地和熟地育成当归苗抗逆生理特性的差异[J]. 草业学报, 2019, 28(11): 86-95.
BAI G, GUO F X, CHEN Y, et al. Differences in physiological resistance traits of *Angelica sinensis* seedlings from uncultivated and cultivated fields in Min County[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(11): 86-95.

[20] 姜小凤, 郭凤霞, 陈垣, 等. 休耕和种植作物对黑麻土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 229-235.
JIANG X F, GUO F X, CHEN Y, et al. Effect of fallowing and planting crops on soil fertility of black flax soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 229-235.

[21] WANG Z G, BAO X G, LI X F, et al. Intercropping maintains soil fertility in terms of chemical properties and enzyme activities on a timescale of one decade[J]. Plant and soil, 2015, 391(1): 265-282.

[22] LI X G, WANG X X, DAI C C, et al. Effects of intercropping with *Atractylodes lancea* and application of bio-organic fertiliser on soil invertebrates, disease control and peanut productivity in continuous peanut cropping field in subtropical China[J]. Agroforestry Systems, 2014, 88(1): 41-52.

[23] 刘雪枫, 梁希晨, 岳栋芳, 等. 高效液相色谱法测定当归芍药散不同极性部位中阿魏酸和芍药苷的含量[J]. 甘肃中医药大学学报, 2019, 36(1): 33-38.
LIU X F, LIANG X C, YUE D F, et al. Content determination of ferulic acid and paeoniflorin of different polar parts in Danggui Shaoyao San by HPLC[J]. Journal of Gansu University of Chinese Medicine, 2019, 36(1): 33-38.

[24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1981.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1981.

[25] DURIS V, BARTKOVÁ R, TIRPÁKOVÁ A. Principal component analysis and factor analysis for an atanassov IF data set[J]. Mathematics, 2021, 9(17): 2067.

[26] 刘文博, 梁盛楠. 基于伪柯西类核函数的主成分降维方法[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2021, 53(3): 30-35.
LIU W B, LIANG S N. Principal component dimension reduction method based on pseudo-cauchy class kernel functions[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2021, 53(3): 30-35.

[27] 颜秋晓, 王道平, 李相楹, 等. 黔产 7 种药用植物重金属污染特征及健康风险评价[J]. 沈阳药科大学学报, 2022, 39(9): 1091-1099.
YAN Q X, WANG D P, LI X Y, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metal content in seven medicinal plants from Guizhou Province in China[J]. Journal of Shenyang Pharmaceutical University, 2022, 39(9): 1091-1099.

[28] 邹成林, 黄开健, 翟瑞宁, 等. 基于隶属函数法和主成分分析评价玉米萌发期抗旱性[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(13): 7-13.
ZOU C L, HUANG K J, ZHAI R N, et al. Evaluation of drought resistance of maize during germination stage based on membership function method and principal components analysis [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(13): 7-13.

[29] 刘海光, 罗振, 董合忠. 植物硝态氮吸收和转运的调控研究进展[J]. 生物技术通报, 2021, 37(6): 192-201.
LIU H G, LUO Z, DONG H Z. Research progress on the regulation of NO_3^- uptake and transport in plant[J]. Biotechnology Bulletin, 2021, 37(6): 192-201.

[30] 刘天源, 周天财, 孙建, 等. 青藏高原东缘沙化草甸植物氮磷的分配和耦合特征[J]. 草业科学, 2021, 38(2): 209-220.
LIU T Y, ZHOU T C, SUN J, et al. Distribution and coupling characteristics of plant nitrogen and phosphorus along desertification gradients in alpine meadows, eastern Tibet Plateau[J]. Pratacultural Science, 2021, 38(2): 209-220.

[31] 张新慧, 张恩和, 王永捷, 等. 不同前茬对当归药材产量及品质的影响[J]. 中药材, 2010, 33(11): 1678-1680.
ZHANG X H, ZHANG E H, WANG Y J, et al. Effects of different previous crops on the yield and quality of *Angelica sinensis* [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2010, 33(11): 1678-1680.

[32] 张真, 刘学周, 包亚军, 等. 基于生物量、活性物质积累和抗氧化能力的当归种植茬口选择[J]. 甘肃农业大学学报, 2018, 53(6): 82-89.
ZHANG Z, LIU X Z, BAO Y J, et al. Selection of cropping rotations of *Angelica sinensis* based on biomass, bioactive compounds accumulation and antioxidant capacity[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2018, 53(6): 82-89.

[33] 白刚. 岷县农田土壤微生态对当归熟地育苗效应影响机理的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
BAI G. Study of effect mechanism for cropland soil micro-ecology on *Angelica sinensis* seedling nursing in Min county [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.

[34] 金彦博. 岷县不同农茬口育苗对当归产量和质量的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
JIN Y B. Studies of seedling nursing under various crop residues in Min county on yield and quality of *Angelica sinensis*[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.

[35] 薛莲, 刘国彬, 戴全厚, 等. 黄土丘陵区退耕撂荒地土壤微生物量演变过程[J]. 中国农业科学, 2009, 42(3): 943-950.
XUE S, LIU G B, DAI Q H, et al. Dynamics ofsoil microbial biomass on the abandoned cropland in loess hilly area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(3): 943-950.

[36] 张丽莉, 武志杰, 陈利军, 等. 不同种植制度土壤氧化还原酶活性和动力学特征[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 343-347.
ZHANG L L, WU Z J, CHEN L J, et al. Soil oxidoreductase activity and its kinetic characteristics under different cropping system[J].Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(1): 343-347.

[37] 王秀芬, 李静, 方光明, 等. 宁夏地产黄芪药材质量评价研究[J]. 北方园艺, 2020,(18): 114-121.
WANG X F, LI J, FANG G M, et al. Study on the quality evaluation of Ningxia astragali radix[J]. Northern Horticulture, 2020,(18): 114-121.

[38] 白刚, 郭凤霞, 陈垣, 等. 农茬口对土壤特性及熟地当归育苗的调控效应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(5): 701-712.
BAI G, GUO F X, CHEN Y, et al. Regulated effects of preceding crop on soil property and cultivating seedlings for *Angelica sinensis* on cultivated farmland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(5): 701-712.

[39] 王利立. 密度对大麦间作豌豆氮素利用的影响及机理[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
WANG L L. Mechanism of plant density effects on nitrogen use in barley/pea intercropping system[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2017.

[40] 宋丽萍, 罗珠珠, 李玲玲, 等. 陇中黄土高原半干旱区苜蓿-作物轮作对土壤物理性质的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(7): 12-20.
SONG L P, LUO Z Z, LI L L, et al. Effect of lucerne-crop rotations on soil physical properties in the semi-arid loess plateau of central Gansu[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(7): 12-20.

[41] 唐朝辉, 郭峰, 张佳蕾, 等. 甘薯花生轮作对花生生理及产量品质的影响[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(6): 1002-1009.
TANG C H, GUO F, ZHANG J L, et al. Effect of sweet potato and peanut rotation on physiological characteristics and yield and quality of peanut[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2020, 42(6): 1002-1009.

[42] 倪红. 黄土旱塬区一年龄紫花苜蓿-冬小麦轮作系统产量和水氮利用的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
NI H. The study on yield, water and nitrogen utilization of 1-yr alfalfa-winter wheat rotation system in the loess plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.

[43] 刘莉莉. 互助县不同环境对当归生长及产量品质的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
LIU L L. Effects of different environment on growth, yield and quality of *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels in Huzhu county[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.

[44] 李国业, 高瑞琴, 龙倩, 等. 栽培模式对当归生产力的作用[J]. 草业科学, 2022, 39(9): 1880-1889.
LI G Y, GAO R Q, LONG Q, et al. Effect of cultivation methods on productivity of *Angelica sinensis*[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(9): 1880-1889.