文章编号:1000-7601(2025)05-0109-11 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.11

桃儿七养分吸收规律及其与药效成分积累的关系

徐晓娟,毛 洁,段 莹,久西加,杜 弢,
陈红刚,高素芳,王惠珍,曾翠云

(甘肃中医药大学药学院,甘肃 兰州 730000)

摘 要:通过研究桃儿七农艺性状、干物质积累、营养元素及药效成分含量变化,明晰桃儿七养分吸收规律及其与药效成分积累的关系。以 3 年生桃儿七为研究对象,测定不同生育时期农艺性状、干物质积累量、营养元素和根中 4 类药效成分含量。结果表明:(1)桃儿七各农艺性状指标均随生长期延续呈增长趋势,干物质积累量随着生长期的推进呈现“慢-快-慢”的规律。(2)生长期内对氮肥和钾肥的需求较大,11 种营养元素积累量由大到小依次为氮>钾>钙>磷>镁>铁>硫>锰>硼>锌>铜;地上部和地下部氮、磷、钾元素积累量均在出苗后 150 d 达到较高水平。(3)根中鬼臼毒素、槲皮素、山柰酚积累量的变化规律基本一致,呈先增加后趋于平缓再增加的趋势,4′-去甲鬼臼毒素积累量则先增加后趋于稳定。鬼臼毒素、槲皮素、山柰酚、4′-去甲鬼臼毒素积累量均于枯萎期达到最大值($P<0.05$),分别为 130.79、3.16、4.37、4.30 mg·株$^{-1}$。(4)氮、磷、钾、硼元素对药效成分的积累具有促进作用。氮、钾、硼元素含量与槲皮素含量呈显著正相关($P<0.05$),磷元素含量与槲皮素和山柰酚含量呈显著正相关($P<0.01$),氮元素含量与山柰酚含量呈显著正相关($P<0.05$),钾和硼元素含量与鬼臼毒素含量呈极显著正相关($P<0.05$),硼元素含量与 4′-去甲鬼臼毒素含量呈显著正相关($P<0.05$)。钙、铁元素对药效成分的积累可能存在抑制作用。钙元素含量与 4′-去甲鬼臼毒素含量呈极显著负相关($P<0.01$),与鬼臼毒素含量呈显著负相关($P<0.05$),铁元素含量与鬼臼毒素、槲皮素、山柰酚含量呈极显著负相关($P<0.05$)。综上所述,桃儿七旺盛生长期(90~150 d)是干物质积累与养分积累最关键的时期,吸收大量元素顺序从高到低为氮>钾>磷,硼元素也是影响品质的关键元素。建议在旺盛生长期施入大量元素,增叶期(30~90 d)追施硼元素。药效成分含量在枯萎休眠期达到最大值,因此 9 月下旬至 10 月中旬为药材最佳采收期。

关键词:桃儿七;营养元素;养分吸收规律;药效成分积累;采收期

中图分类号:S567.23^{+}9; S184 **文献标志码**:A

Nutrient absorption of *Sinopodophyllum Hexandrum* and its relationship with the accumulation of medicinal components

XU Xiaojuan, MAO Jie, DUAN Ying, JIU Xijia, DU Tao, CHEN Honggang,
GAO Sufang, WANG Huizhen, ZENG Cuiyun

(*College of Pharmacy*, *Gansu University of Chinese Medicine*, *Lanzhou*, *Gansu* 730000, *China*)

Abstract: The changes of agronomic traits, dry matter accumulation, nutrient elements, and medicinal components of *Sinopodophyllum hexandrum* were studied to clarify the nutrient absorption law of *S. hexandrum* and its relationship with the accumulation of medicinal components. Taking 3-year-old *S. hexandrum* as the research object, the agronomic traits, dry matter accumulation, nutrient elements, and four kinds of medicinal components in roots were determined at different growth stages. The results showed that, (1) The agronomic traits of *S. hexandrum* showed an increasing trend with the growth period, and the dry matter accumulation showed a 'slow-fast-slow' rule with the growth period. (2) The demand for nitrogen and potassium fertilizer was large during the growth

收稿日期:2024-12-17 **修回日期**:2025-01-13

基金项目:国家中药材产业技术体系建设专项资金(CARS-21)

作者简介:徐晓娟(1999-),女,甘肃靖远人,硕士研究生,研究方向为中药资源评价、保护与可持续利用。E-mail:xxj.gansu@qq.com

通信作者:杜弢(1967-),男,陕西凤翔人,教授,主要从事药用植物栽培及育种研究。E-mail:gslzdt@163.com

period, and the accumulation of 11 nutrient elements was in the order of nitrogen > potassium > calcium > phosphorus > magnesium > iron > sulfur > manganese > boron > zinc > copper. The accumulation of nitrogen, phosphorus, and potassium in the aboveground and underground parts reached a high level at 150 days after emergence. (3) The changes of podophyllotoxin, quercetin, and kaempferol accumulation in roots were basically the same, showing a trend of increasing first, then leveling off, and then increasing. The accumulation of 4′-demethylpodophyllotoxin increased first and then stabilized. The accumulation of the above four kinds of pharmacodynamic components reached the maximum value ($P<0.05$), which was 130.79, 3.16, 4.37 mg, and 4.30 mg per plant, respectively. (4) Nitrogen, phosphorus, potassium, and boron promoted the accumulation of effective components. Nitrogen, potassium, and boron were significantly positively correlated with quercetin content ($P<0.05$). Phosphorus was significantly positively correlated with quercetin and kaempferol content ($P<0.01$). Nitrogen was significantly positively correlated with kaempferol content ($P<0.05$). Potassium and boron were significantly positively correlated with podophyllotoxin content ($P<0.05$). Boron was significantly positively correlated with 4′-demethylpodophyllotoxin content($P<0.05$). Calcium and iron inhibit the accumulation of medicinal ingredients. Calcium was significantly negatively correlated with 4′-demethylpodophyllotoxin content ($P<0.01$) and podophyllotoxin content ($P<0.05$). Iron was significantly negatively correlated with podophyllotoxin, quercetin, and kaempferol content ($P<0.05$). In summary, the uptake activities of pectin calcium and the vigorous growth period (90~150 d) of *S. hexandrum* are the most critical period for dry matter accumulation and nutrient accumulation. The order of absorbing macro elements is nitrogen, potassium, and phosphorus, and boron is also a key trace element affecting quality. It is suggested that macro elements should be applied in the vigorous growth period, and boron should be applied in the leaf-increasing period (30d~90 d). The content of medicinal components reached its maximum value during the withering dormancy period, so the optimal harvest period is from late September to mid-October.

Keywords: *sinopodophyllum hexandrum*; nutrient elements; nutrient absorption pattern; medicinal components accumulation; harvest period

桃儿七[*Sinopodophyllum hexandrum* (Royle) Ying]为小檗科(Berberidaceae)桃儿七属(*Sinopodophyllum* Ying)多年生草本植物,气微,味苦、性温,有小毒,具有祛风除湿、活血止痛、祛痰止咳等功效[1],多分布于甘肃、陕西、青海、四川、西藏等地[2]。现代药理研究表明,桃儿七根中木脂素类化合物,具有良好的抗肿瘤、抗病毒、抗炎等作用[3-4],其中鬼臼毒素抗癌活性最强,是VP-16、VM-26[5]、GP_7和NK611[6]等抗癌药物的起始物质。桃儿七收录于《四部医典》、《买布协龙》等藏医药书籍,其根作为藏药(二十五味鬼臼丸、红花如意丸、诃子吉祥丸、十一味能消丸)等的原料药材[7],也是鬼臼毒素及其类似物植物提取的重要来源,而鬼臼毒素是合成依托泊苷和替尼泊苷的原料[8]。此外,桃儿七的果实已被《中国药典》收载称'小叶连'[9]。由于桃儿七在自然条件下种子休眠时间长、萌发率低、生育周期长,外加人们对野生桃儿七的肆意采挖[10],致使其原生境破坏,资源日益匮乏,现已被《中国植物红皮书》收录[11],并被《中国珍稀濒危植物名录》列为二级濒危保护植物[12]。

随着供需矛盾的日渐突出,野生植物资源大幅度减少,桃儿七的人工栽培已显得十分迫切。作为药用植物,不能只追求药材产量,要对药材的药效成分及安全性进行考虑。现阶段农户为了追求高产量肆意喷施化肥,导致大量药材出现产量高、药效低的现象[13-15]。因此,科学施肥和规范化栽培显得尤为重要。目前,根茎类药材养分吸收规律及药效成分积累特征的研究主要集中在白芍、黄芪、射干、当归、远志等中药材[16-21],而关于桃儿七养分吸收规律及其与药效成分形成和积累的关系尚缺乏系统研究。因此,本研究以桃儿七为研究对象,测定桃儿七不同生育时期农艺性状、干物质积累、营养元素及药效成分含量,探明桃儿七干物质积累、营养元素吸收及药效成分积累规律,明确影响药效成分积累的营养元素种类,以期为桃儿七制定科学施肥方案和规范化种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于甘肃中医药大学和政药用植物园(103°24′26″E,35°15′57″N),园内海拔2 430 m,年均温5.1℃,年降雨量660 mm,无霜期110 d,最高气

温 29.0℃,最低气温-20.4℃,属典型高寒阴湿区。土壤类型为黑垆土,移栽前 0~20 cm 土壤有机质含量 31.4 g·kg^{-1},碱解氮含量 221.0 mg·kg^{-1},速效钾含量 113.0 mg·kg^{-1},有效磷含量 28.6 mg·kg^{-1},交换性钙含量 21.3 cmol·kg^{-1},交换性镁含量 1.8 cmol·kg^{-1},有效硫含量 83.0 mg·kg^{-1},有效铁含量 51.9 mg·kg^{-1},有效锰含量 21.2 mg·kg^{-1},有效锌含量 2.97 mg·kg^{-1},有效铜含量 1.04 mg·kg^{-1},有效硼含量 0.61 mg·kg^{-1}。

1.2　试验材料

供试材料为 2 年生桃儿七,来源于甘南迭部县,经甘肃中医药大学杜弢教授鉴定为小檗科(Berberidaceae)桃儿七属(*Sinopodophyllum* Ying)桃儿七[*Sinopodophyllum hexandrum*(Royle)Ying]种苗。

1.3　主要仪器与试剂

试验仪器主要包括 FOSS Kjeltec 8400 型全自动凯氏定氮仪(瑞士 FOSS 公司);AA-7000 型原子吸收分光光度计(岛津公司);5110 ICP-OES 型等离子体发射光谱仪(美国 Agilent 公司);Agilent 1260 型高效液相色谱仪(美国安捷伦公司);101-2SB 型精密鼓风干燥箱(杭州绿博仪器有限公司)及 PTX-FA210S 型电子分析天平(华志电子科技有限公司)。试剂对照品鬼臼毒素(518-28-5)和 4′-去甲鬼臼毒素(40505-27-9)均购自兰州植纯生物科技有限责任公司;槲皮素(117-39-5)和山柰酚(520-18-3)均购自兰州普兰特生物科技有限责任公司,以上对照品质量分数均大于 98%;甲醇(20230401)、乙腈(20230301)及甲酸(20200825)为色谱纯;过氧化氢(20240301)购自天津市大茂化学试剂厂;硫酸(20220603)及硝酸(20230804)均购自国药集团化学试剂有限公司。

1.4　田间试验方法

选用肥力均匀一致的地块,深翻旋耕后起垄,垄宽 1 m,垄高 15 cm,垄长 3.5 m。种苗于 2023 年 4 月 14 日移栽,株行距 20 cm×20 cm,试验小区面积为3.5 m^2,每小区移栽种苗 80 株,设 6 个重复。移栽前选用氮磷钾复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O 为 25∶15∶5)做基肥施入,施肥量 300 kg·hm^{-2},7 月追肥,追肥量 128.5 kg·hm^{-2}。桃儿七出苗后用遮光度为 50%的遮阳网进行遮阴。移栽后 15~30 d 为出苗期(5 月初至 5 月中旬),移栽后 30~90 d 为增叶期(5 月下旬至 7 月中旬),移栽后 90~150 d 为旺盛生长期(7 月下旬至 9 月中旬)、移栽后 150~180 d 为枯萎休眠期(9 月中旬至 10 月下旬),自出苗期开始取样,共取样 6 次。每小区采用五点随机取样法,挖取完整植株,去掉泥土,编号后迅速装入取样袋。

1.5　测定指标与方法

1.5.1　*农艺性状测定*　出苗后调查记录植株的株高、株幅、叶面积、叶柄长、叶柄粗、茎基部粗、根长、根粗、根数、地上部鲜质量、单根鲜质量、全株鲜质量等指标,用直尺、游标卡尺(CR2032,上海赛-量具有限公司)测量,分析天平称重。

1.5.2　*干物质积累量测定*　将采挖后的根部和地上部分开,清洗植株表面泥土后用纸擦干表面水分,105℃杀青 30 min 后,70℃烘干至恒重,称取干物质量。干燥后的样品粉碎后过 100 目筛,密封保存至 4℃冰箱备用。

1.5.3　*矿质元素含量测定*　取样品 0.1 g(精确至 0.000 1 g),利用 H_2SO_4-H_2O_2 法消化,取消煮液经凯氏定氮仪测氮,钼锑抗比色法测磷,火焰分光光度法测钾。另取样品 0.2 g,加入 9.0 mL 硝酸和 1.0 mL 高氯酸进行消解,待消解液呈无色透明时,放置冷却,取消解液适当稀释后采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测钙、镁、铜、锌、铁、锰、硫、硼的含量。按照公式分别计算元素积累量和不同时期元素积累比。

元素积累量(g·m^{-2})= 各部位元素含量(%)×单位面积各部位干质量(g·m^{-2})

不同时期元素积累比为各时期营养元素积累量的比值

1.5.4　*药效成分含量测定*　参照刘盈盈等[22]、叶耀辉等[23]建立的方法,利用 HPLC 法检测根中鬼臼毒素、4′-去甲鬼臼毒素、槲皮素和山柰酚含量。色谱条件:采用 ZORBAX SB-Aq 安捷伦(250 mm×4.6 mm,5μm)色谱柱;流动相乙腈(A)、0.04%甲酸水溶液(B),梯度洗脱(0~5 min,10%~15%A,90%~85%B;5~15min,15%~28%A,85%~72%B;15~30 min,28%~28%A,72%~72%B;30~40 min,28%~45%A,72%~55%B;40~50 min,45%~30%A,55%~70%B;50~60 min,30%~10%A,70%~90%B;60~70 min,10%~10%A,90%~90%B);体积流量 1.0 mL·min^{-1},进样体积 10μL,检测波长 254 nm,柱温 30℃。

供试品溶液制备:精密称取桃儿七粉末 0.5 g 于 50 mL 具塞锥形瓶中,加甲醇 30 mL,称取质量,超声处理 60 min 后,冷却,用甲醇补足损失的质量,摇匀,离心,取上清液即得供试品溶液。按照公式计算药效成分积累量:

药效成分积累量(mg·株$^{-1}$)=

药效成分含量×单株根干质量

1.6 数据处理与分析

数据采用 SPSS 27.0 统计软件进行分析,用 Origin 2022 软件作图。

2 结果与分析

2.1 农艺性状变化动态

通过观察植株变化特征,可将 3 年生植株生长期大致划分为出苗期:50%植株出苗,叶柄曲茎出土,叶蜷曲生长,当叶片露出土表后直立生长,叶片从卷曲褶皱状态逐渐展开呈平滑状态,光泽度高,根少而细。增叶期:出现第 2 枚叶片,叶片增大,光泽度较高,根数增多。旺盛生长期:具 3~4 枚叶片,叶面积扩大,根数显著增加达到最大,侧根明显增多,出现越冬芽。枯萎休眠期:叶片开始变黄,地上部枯萎,茎基部增粗,根长和根粗增加。各农艺性状均随生长期延续呈增长趋势,其中株高、株幅(自然状态下植株叶丛延展至最大处的宽度)、叶柄粗、地上鲜质量均在旺盛生长期达到最大($P<0.05$)(表 1),地下部分农艺性状则在枯萎休眠期达到最大($P<0.05$)(表 2)。

2.2 干物质积累动态与分配规律

出苗期干物质积累缓慢,整株干物质积累量仅为 1.04 g·株$^{-1}$;增叶期根部干物质积累量增加达 3.21 g·株$^{-1}$;旺盛生长期全株积累量达到 7.05 g·株$^{-1}$,地上部干物质积累量增加达 1.96 g·株$^{-1}$;枯萎休眠期全株积累量达到峰值 7.06 g·株$^{-1}$(图 1)。根部开始积累时干物质占比 79.20%,至枯萎休眠期分配比达到最大 82.80%。地上部分在增叶期生长迅速,分配比达 25.52%,至旺盛生长期达到峰值 27.85%(表 3)。

2.3 营养元素积累动态与分配规律

2.3.1 根及地上部氮、磷、钾含量及其积累量变化动态 地上部氮素含量随着生长期延续呈下降的趋势,出苗期的氮素含量显著高于其他生长时期($P<0.05$),至枯萎休眠期最低 1.77%;根部氮素含量随着生长期延续呈上升的趋势,在枯萎休眠期达到最大(3.12%)。地上部和根部氮素积累量随生长期推进呈上升趋势,两者氮素积累量均在旺盛生长期显著上升,此时地上部氮素积累量达到最高(1.44 g·m^{-2}),根部氮素积累量在枯萎休眠期达到最高(4.62 g·m^{-2})(图 2)。

表 1 不同生育时期桃儿七地上部分农艺性状

Table 1 Agronomic traits of aboveground parts of *Sinopodophyllum hexandrum* in different growth stage

生育时期 Growth stage	移栽后天数 Days after transplantation/d	株高 Plant height /cm	株幅 Plant width /cm	叶面积 Leaf area /cm^2	叶柄长 Petiole length /cm	叶柄粗 Petiole diameter /mm	地上部鲜质量 Aboveground fresh mass/g
出苗期 Period of emergence	30	7.35±2.31c	8.74±2.83c	18.08±6.25d	6.96±2.08c	1.29±0.15b	1.24±0.61c
增叶期 Leaf-increasing period	60	9.38±2.51c	8.96±1.50c	28.90±6.44d	7.77±2.10c	1.61±0.27b	1.39±0.35c
	90	15.15±2.55b	16.13±2.62b	47.20±14.71c	11.45±2.20b	2.27±0.42a	3.25±0.94b
旺盛生长期 Vigorous growth period	120	17.92±2.52b	15.39±2.18b	52.80±8.98c	11.52±2.16b	2.30±0.91a	4.27±1.25b
	150	23.04±4.38a	25.35±5.44a	72.88±11.75b	11.79±2.59b	2.44±0.47a	9.13±2.62a
枯萎休眠期 Withering dormancy period	180	16.95±2.89b	16.61±5.22b	118.48±30.52a	18.74±4.18a	1.56±0.27b	1.39±0.34c

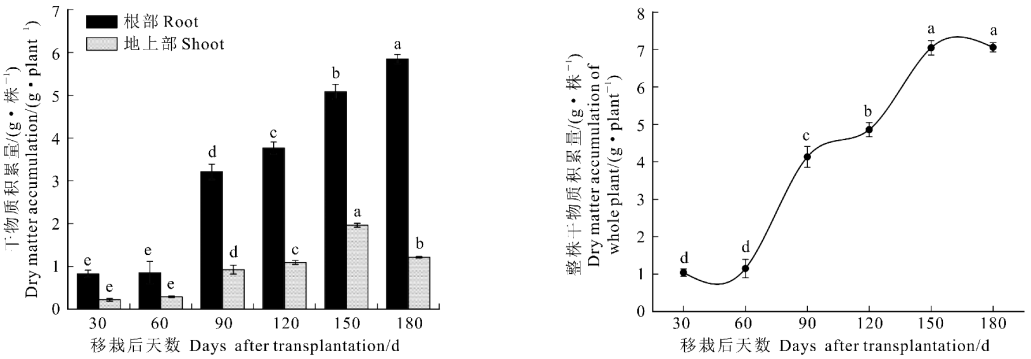
注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

表 2 不同生育时期桃儿七地下部分农艺性状

Table 2 Agronomic traits of underground parts of *Sinopodophyllum hexandrum* in different growth stage

生育时期 Growth stage	移栽后天数 Days after transplantation/d	茎基部粗 Stem base thick /mm	根长 Root length /cm	根粗 Root thick /cm	根数 Number of roots/条	单根鲜质量 Single root fresh mass/g	全株鲜质量 Whole plant fresh mass/g
出苗期 Period of emergence	30	4.83±1.58cd	9.02±1.73e	1.42±0.36c	11.10±4.65c	2.17±0.88d	3.95±1.88d
增叶期 Leaf-increasing period	60	4.58±0.56d	14.41±4.11d	1.70±0.39c	11.60±2.72c	3.21±1.26d	4.59±1.55d
	90	6.37±0.86bc	16.85±3.88cd	2.11±0.33b	17.20±1.55b	6.76±1.94c	10.00±2.76c
旺盛生长期 Vigorous growth period	120	7.45±1.27b	19.66±3.84bc	2.11±0.45b	17.90±3.87b	9.44±3.55c	13.66±4.52b
	150	9.75±0.98a	20.21±3.65ab	2.17±0.31b	22.70±4.24a	12.40±4.22b	21.53±5.52a
枯萎休眠期 Withering dormancy period	180	9.83±2.68a	23.50±2.55a	2.68±0.33a	23.36±4.57a	18.77±5.35a	20.16±5.35a



注:不同小写字母表示相同部位不同时间下差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between the same parts at different time ($P<0.05$). The same below.

图 1　桃儿七干物质积累量动态变化

Fig.1　Dynamic changes of dry matter accumulation in *Sinopodophyllum hexandrum*

表 3　不同生育时期桃儿七各器官干物质的分配比

Table 3　Distribution ratio of dry matter in different organs of *Sinopodophyllum hexandrum* in different growth stage

生育时期 Growth stage	移栽后天数 Days after transplantation/d	根部/% Root	地上部/% Aboveground
出苗期 Period of emergence	30	79.20	20.80
增叶期 Leaf-increasing period	60	74.48	25.52
	90	77.64	22.36
旺盛生长期 Vigorous growth period	120	77.52	22.48
	150	72.15	27.85
枯萎休眠期 Withering dormancy period	180	82.80	17.20

地上部磷素含量随着生长期延续呈先降后升的趋势,在出苗期达到最高(0.35%,$P<0.05$),旺盛生长期快速增加;根部磷素含量随着生长期延续呈上升趋势,增叶期从 0.13%快速上升至 0.32%,至枯萎休眠期最高(0.52%,$P<0.05$)。地上部和根部磷素积累量随生长期推进呈上升趋势,地上部磷素积累量在旺盛生长期达到最大 0.17 g·m^{-2};根部磷素积累量在枯萎休眠期显著高于其他生育时期($P<0.05$)(图 3)。

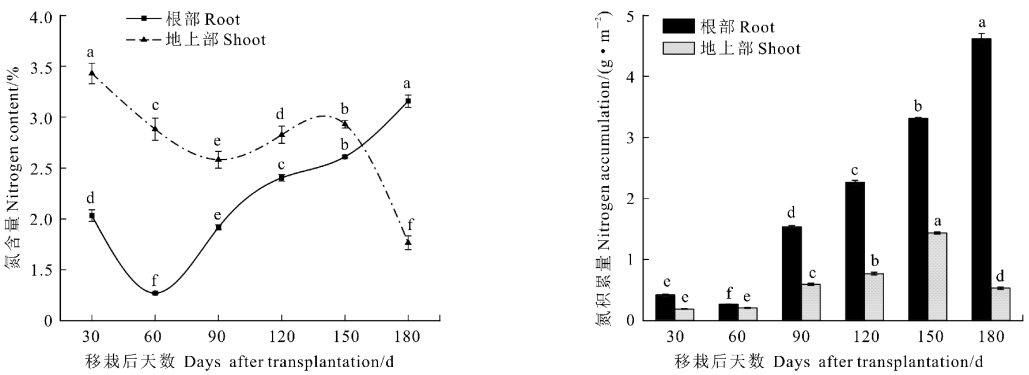


图 2　桃儿七氮含量及其积累量动态变化

Fig.2　Dynamic changes in nitrogen content and its accumulation of *Sinopodophyllum hexandrum*

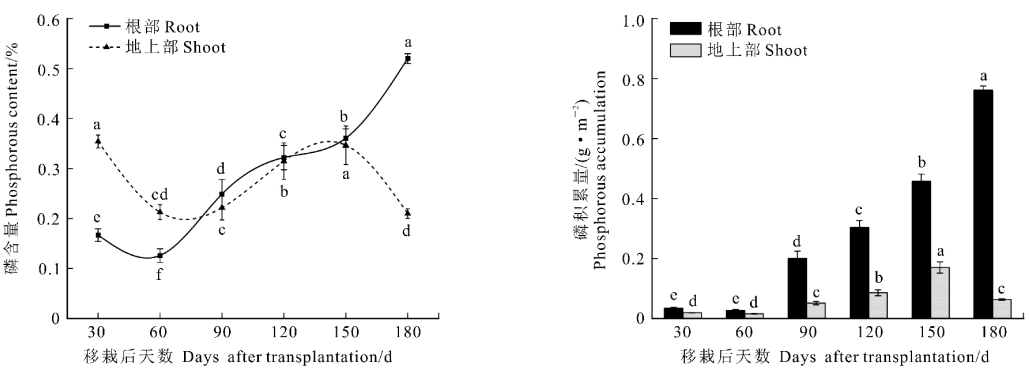


图 3　桃儿七磷含量及其积累量动态变化

Fig.3　Dynamic changes in phosphorus content and its accumulation of *Sinopodophyllum hexandrum*

地上部钾素含量随着生长期延续呈下降趋势，出苗期显著高于其他生育时期($P<0.05$)，增叶期呈明显下降趋势，在枯萎休眠期最低(0.97%)；根部钾素含量随着生长期延续呈先上升后趋于平缓的趋势，增叶期后无明显变化。地上部钾素积累量随生长期推进呈先增加后减少趋势，在旺盛生长期达到最大(0.76 g·m^{-2}，$P<0.05$)；根部钾素积累量随生长期推进呈增加的趋势，在枯萎休眠期达到最大(1.46 g·m^{-2}，$P<0.05$)(图 4)。

2.3.2 根及地上部分微量元素含量变化 中微量元素含量在不同生长期呈阶段性波动变化；含量大小依次为 Ca>Mg>Fe>S>Mn>B>Zn>Cu。中量元素地上部钙含量呈先增加后降低的趋势，根部钙含量在出苗期达到最大(13.15 g·kg^{-1})，出苗期到增叶后期钙素向地上部转移，之后向根部转移。地上部镁含量和根部硫含量变化趋势一致，呈先升高后降低再升高的趋势，均在枯萎休眠期达最高值($P<0.05$)，根部镁含量变化范围为 3.43～4.38 g·kg^{-1}。地上部硫含量变化呈下降趋势且变化幅度较小，镁和硫在地下部和根部分配变化幅度不大。

微量元素地上部铁、锰含量变化趋势一致，总体呈升高趋势，均在枯萎休眠期达最高值($P<0.05$)，地上部锌、铜含量变化趋势一致，呈先降低后升高的趋势，地上部硼含量呈先增加后降低的趋势。根部铁含量变化呈下降趋势，根部锰、锌含量变化趋势基本一致；根部铜含量变化范围为4.71～8.11 mg·kg^{-1}，根部硼含量增叶期达到峰值 15.9 mg·kg^{-1}。微量元素铁在出苗期到旺盛生长期先缓慢向地上部分配，后向根部分配，之后向地上部分配；锰先向地上部分配后向根部分配，枯萎休眠期向地上部转移；铜分分配趋势整体变化不大；锌在出苗期到旺盛生长期先向地下部分配，之后向根部分配；硼从出苗期到增叶期一直向根部转移，旺盛生长期向地上部转移，之后向根部转移(表 4、表 5)。

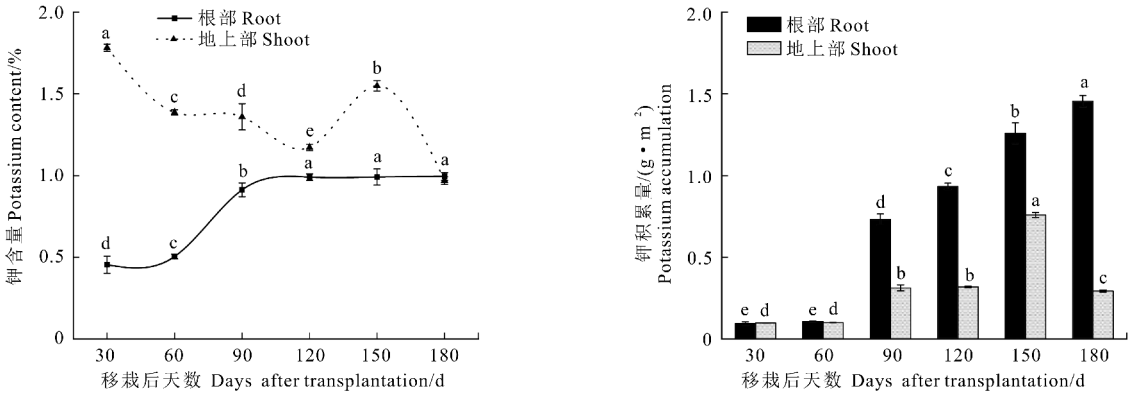


图 4 桃儿七钾含量及其积累量动态变化

Fig.4 Dynamic changes in potassium content and its accumulation of *Sinopodophyllum hexandrum*

表 4 桃儿七不同生育时期地上部和根部中量元素含量/(g·kg^{-1})

Table 4 Content of essential elements in the shoot and root of *Sinopodophyllum hexandrum* at different growth stage

生育时期 Growth stage	移栽后天数 Days after transplantation/d	植株部位 Plant part	钙 Ca	镁 Mg	硫 S
出苗期 Period of emergence	30	根部 Root	13.15±0.09a	4.29±0.06ab	1.92±0.06b
		地上部 Shoot	10.30±0.03f	2.04±0.03e	1.48±0.05a
增叶期 Leaf-increasing period	60	根部 Root	8.60±0.02b	3.43±0.06f	1.97±0.04b
		地上部 Shoot	20.24±0.06c	2.71±0.03d	1.39±0.02b
	90	根部 Root	5.82±0.09f	3.90±0.08e	1.82±0.07cd
		地上部 Shoot	24.10±0.04b	2.85±0.02b	1.16±0.02d
旺盛生长期 Vigorous growth period	120	根部 Root	7.69±0.07c	4.20±0.08bc	1.77±0.05d
		地上部 Shoot	24.80±0.04a	2.79±0.01c	1.22±0.02c
	150	根部 Root	7.31±0.05d	4.10±0.01d	1.90±0.03bc
		地上部 Shoot	14.80±0.07d	1.96±0.02f	1.22±0.03c
枯萎休眠期 Withering dormancy period	180	根部 Root	7.27±0.06e	4.38±0.01a	2.22±0.02a
		地上部 Shoot	14.50±0.02e	3.36±0.05a	0.64±0.02e

2.3.3　营养元素的分配规律　从营养元素积累比来看,整个生长期内分配营养元素的顺序为 N>K>Ca>P >Mg>Fe>S>Mn>B>Zn>Cu,尤其对氮的积累比例较高,N∶P∶K∶Ca∶Mg∶S(积累比)在旺盛生长期最高,为 15.49∶2.02∶6.49∶6.25∶2.21∶1.00,微量元素 Fe∶Mn∶Cu∶Zn∶B 的积累比则在增叶期最高,为 254.25∶8.30∶1.00∶1.58∶2.71,后随着生长期的延长,积累比逐渐降低(表 6)。

2.4　药效成分动态变化规律

根中鬼臼毒素含量随生长期推进呈先增加后减少再增加趋势,变化区间在 0.31% ~ 2.24%之间,4′-去甲鬼臼毒素含量则表现为先增加后趋于稳定;槲皮素、山柰酚含量总体呈增加趋势,除 4′-去甲鬼臼毒素以外,三者含量均在枯萎休眠期显著高于其他时期($P<0.05$)。随着生长期的延续桃儿七根中鬼臼毒素、槲皮素、山柰酚积累量的总变化趋势基本一致,表现为先增加后趋于平缓再大幅增加的变化趋势,4′-去甲鬼臼毒素积累量与其含量变化规律一致;4 类药效成分积累量均于枯萎期达到最大值($P<0.05$),分别为 130.79、3.16、4.37、4.30 mg·株$^{-1}$(图 5)。

2.5　营养元素与农艺性状及药效成分相关性分析

为了研究不同生长期营养元素含量与农艺性状及药效成分之间的相关性,采用 Origin 软件,以 11 种营养元素、13 种农艺性状、4 种药效成分为变量,进行 Person 相关性分析,结果见图 6。大量元素氮与槲皮素、山柰酚含量,茎基部粗、根数、全株鲜、单根鲜质量及产量呈显著正相关关系($P<0.05$),磷元素与槲皮素、山柰酚、茎基部粗、根粗、单根鲜质量、产量呈极显著正相关关系($P<0.01$),钾元素与鬼臼毒素、产量呈极显著正相关($P<0.01$);中量元素钙元素与 4′-去甲鬼臼毒素呈极显著负相关($P<0.01$),与鬼臼毒素呈显著负相关($P<0.05$);微量元素硼与鬼臼毒素含量为极显著正相关($P<0.01$),铁元素与根长、根粗呈极显著负相关($P<0.05$)(图 6)。

2.6　营养元素与农艺性状及药效成分回归关系

将营养元素与农艺性状及药效成分进一步进行逐步线性回归,建立多元回归方程。以营养元素为自变量,农艺性状、药效成分含量分别作为因变量进行多元逐步回归分析,以纳入所有对因变量作用显著的自变量,剔除作用不显著的自变量,从而建

表 5　桃儿七不同生育时期地上部和根部微量元素含量

Table 5　Content of trace elements in shoot and root of *Sinopodophyllum hexandrum* at different stage

生育时期 Growth stage	移栽后天数 Days after transplantation/d	植株部位 Plant part	铁 Fe /(g·kg^{-1})	锰 Mn /(mg·kg^{-1})	锌 Zn /(mg·kg^{-1})	铜 Cu /(mg·kg^{-1})	硼 B /(mg·kg^{-1})
出苗期 Period of emergence	30	根部 Root	1.61±0.02a	40.93±0.14c	8.73±0.08d	8.11±0.08a	2.74±0.01f
		地上部 Shoot	0.64±0.00f	28.42±0.14f	10.23±0.24b	8.28±0.08b	19.04±0.08e
增叶期 Leaf-increasing period	60	根部 Root	1.40±0.03b	45.04±0.42b	9.18±0.06c	4.71±0.07f	4.22±0.01e
		地上部 Shoot	1.56±0.01b	64.88±0.99b	9.23±0.02c	5.91±0.06d	26.87±0.09d
	90	根部 Root	1.17±0.01c	29.28±0.03f	7.56±0.31e	5.75±0.01e	15.91±0.05a
		地上部 Shoot	1.43±0.00c	62.24±1.29c	6.48±0.25e	4.82±0.03e	29.72±0.09d
旺盛生长期 Vigorous growth period	120	根部 Root	0.95±0.01e	38.22±0.68d	12.83±0.22a	7.33±0.06d	9.64±0.06d
		地上部 Shoot	1.13±0.01d	58.76±0.93d	5.96±0.13f	4.41±0.03f	44.79±0.18a
	150	根部 Root	1.11±0.01d	48.64±0.34a	12.60±0.30a	6.91±0.06c	12.32±0.03c
		地上部 Shoot	0.88±0.01e	47.34±0.90e	7.67±0.24d	6.33±0.08c	32.71±0.13b
枯萎休眠期 Withering dormancy period	180	根部 Root	0.87±0.01f	34.09±0.24e	11.74±0.18b	7.94±0.05b	14.54±0.11b
		地上部 Shoot	9.21±0.09a	221.23±0.96a	25.94±0.42a	10.52±0.13a	14.79±0.11f

表 6　桃儿七不同生育时期营养元素积累比

Table 6　Nutrient element accumulation ratio of *Sinopodophyllum hexandrum* in different growth stage

生育时期 Growth stage	移栽后天数 Days after transplantation/d	N∶P∶K∶Ca∶Mg∶S	Fe∶Mn∶Cu∶Zn∶B
出苗期 Period of emergence	30	12.73∶1.13∶4.01∶6.87∶2.09∶1.00	172.98∶4.70∶1.00∶1.11∶0.76
增叶期 Leaf-increasing period	60	9.23∶0.81∶4.00∶6.35∶1.78∶1.00	287.37∶9.98∶1.00∶1.83∶1.99
	90	12.32∶1.45∶6.04∶5.90∶2.19∶1.00	221.13∶6.61∶1.00∶1.32∶3.43
旺盛生长期 Vigorous growth period	120	15.19∶1.95∶6.28∶7.01∶2.36∶1.00	148.82∶6.41∶1.00∶1.69∶2.62
	150	15.78∶2.09∶6.70∶5.49∶2.05∶1.00	155.23∶7.16∶1.00∶1.66∶2.67
枯萎休眠期 Withering dormancy period	180	14.97∶2.39∶5.08∶4.36∶2.16∶1.00	274.68∶7.90∶1.00∶1.69∶1.74

立最优回归方程,结果见表 7。影响产量和山柰酚的主导元素为有效磷;影响根数的主导元素为有效钾;影响根长和根粗的主导元素为有效铁;影响鬼臼毒素含量的营养元素为有效铁、有效硼;影响 4′-去甲鬼臼毒素含量的主导元素为有效钙;影响槲皮素含量的主导元素为有效磷、有效铜(表 7)。

3 讨 论

干物质是光合作用产物积累的最高形式,是衡量有机物质、营养元素积累的重要指标。本研究表明,桃儿七干物质积累呈现 S 型曲线(慢-快-慢)(图 1),这与云木香干物质积累规律相似[24]。全株干物质随生长期延续逐渐增加。出苗期植株生长较慢,干物质积累量较少,主要贮藏在叶器官中;增叶期干物质积累大幅增加,叶生长速度加快、叶面积变大;旺盛生长期是桃儿七干物质积累最快的时期,地上部和根部的干物质积累呈直线增长,原因可能是生长前期以地上部增长量较大,生长后期生长中心由地上部转移至根部。枯萎休眠期叶柄粗表现为负增长(表 1),可能是由于天气转凉,地上部分开始慢慢枯黄直至停止生长,叶柄失水发生皱缩导致变细,此时期根部鲜质量达到最大(表 2)。

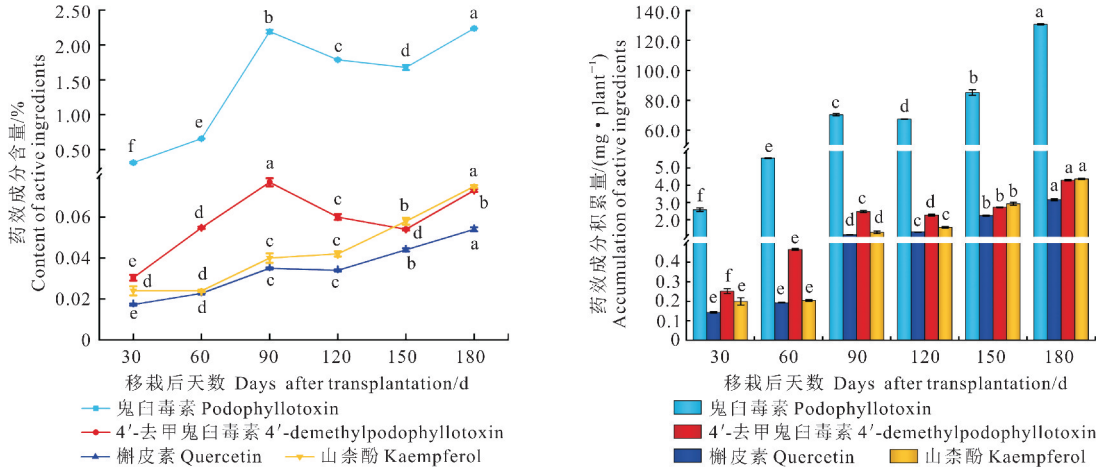
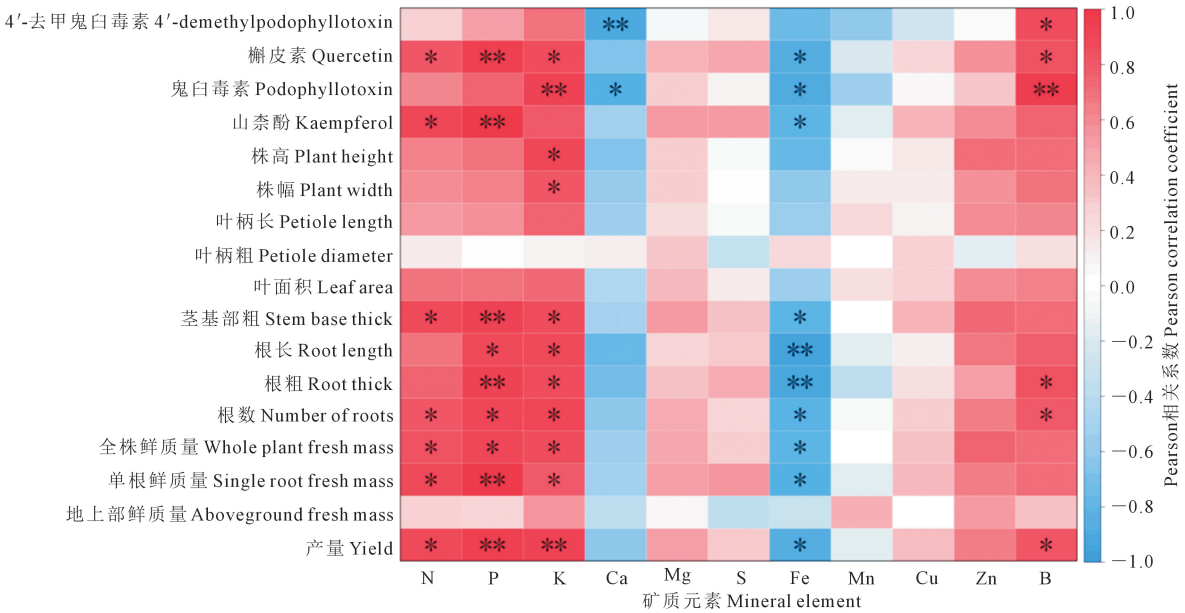


图 5 桃儿七根中药效成分含量及积累量动态变化

Fig.5 Dynamic changes in the content and accumulation of medicinal components in roots of *Sinopodophyllum hexandrum*



注:* 和 * * 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。

Note: * and * * indicate significant differences at the $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

图 6 桃儿七农艺性状和药效成分含量与矿质元素含量的相关关系

Fig.6 Correlation between agronomic traits, medicinal components, and mineral elements content of *Sinopodophyllum hexandrum*

表 7　桃儿七农艺性状和药效成分与矿质元素的逐步回归模型

Table 7　Stepwise regression model of agronomic traits, medicinal components, and mineral elements of *Sinopodophyllum hexandrum*

项目 Item	回归方程 Regression equation	调整 R^2 Adjusted R^2	F 值 F value	P 值 P value
株高 Plant height	$Y=-16.674+23.371X_{K}+3240.597X_{Mn}$	0.969	79.146	* *
株幅 Plant width	$Y=-0.561+19.503X_{K}$	0.591	8.227	*
茎基部粗 Stem base thick	$Y=2.751+15.080X_{P}$	0.848	28.791	* *
根数 Number of roots	$Y=2.273+18.612X_{K}$	0.792	20.013	*
根长 Root length	$Y=38.314-177.374X_{Fe}$	0.924	61.528	* *
根粗 Root thick	$Y=3.766-14.623X_{Fe}$	0.855	30.372	* *
全株鲜质量 Whole plant fresh mass	$Y=-1.528+47.612X_{P}$	0.778	18.564	*
单根鲜质量 Single root fresh mass	$Y=9.056+48.269X_{P}-35.310X_{Mg}$	0.995	454.061	* *
产量 Yield	$Y=-20.042+349.601X_{P}$	0.892	42.478	* *
4′-去甲鬼臼毒素 4′-Demethylpodophyllotoxin	$Y=0.108-0.061X_{Ca}$	0.819	23.633	* *
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	$Y=1.709-10.463X_{Fe}+1018.681X_{B}$	0.983	143.996	* *
槲皮素 Quercetin	$Y=0.027+0.106X_{P}-33.935X_{Cu}$	0.973	89.763	* *
山柰酚 Kaempferol	$Y=0.004+0.136X_{P}$	0.951	97.986	* *

注:* 和 * * 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关。X 的右下脚字母代表矿质元素种类。

Note: * and * * indicate significant differences at the $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively. The bottom right letter of X represents the type of mineral element.

营养元素在植物生理代谢和生长过程中作用不可忽视,大量元素氮、磷、钾,中量元素钙、镁、硫及微量元素锰、铁、铜、锌、硼是植物正常生长发育所必需的元素,与中药材的生长及药用功效密切相关[25]。本研究表明根部氮、磷含量随生育期推进呈上升规律,钾含量呈先增后趋于平稳趋势;地上部氮、钾含量随生育期推进呈下降规律,磷含量呈先减后增再减的变化趋势。增叶期根部氮、磷、钾含量呈增长趋势,原因可能是此时期根逐渐增多及增长;地上部和根部氮、磷、钾元素积累量均在旺盛生长期达到较高水平(图 2~4)。地上部氮、钾含量高于根部,可能是地上部茎叶进行光合作用,而氮素与体内各种物质及能量转化有关,钾能促进光合产物的合成和运输,与植物体内各器官中蔗糖、淀粉等的含量相关[26]。远志地上部含氮量始终高于根系[21],膜荚黄芪茎叶和根系中的营养元素含量表现为氮>钾>磷[18],这与本研究的结果一致。在全生长期内对氮肥和钾肥的需求较大,11 种营养元素积累总量大小顺序氮>钾>钙>磷>镁>铁>硫>锰>硼>锌>铜。桃儿七以根入药,若在根干物质积累量最大(10 月中旬)时采收,可收获桃儿七约为 146.25 kg·hm^{-2},则每生产 100 kg 根植株需积累大量元素氮 3.519 kg,钾 1.194 kg,磷 0.563 kg,中量元素钙 1.026 kg,镁 0.507 kg,硫 0.235 kg,微量元素铁 0.277 kg,锰 0.008 kg,锌 0.002kg,硼 0.002kg,铜 0.001 kg(表 4,表 5)。

植物的生长是多种元素共同作用的结果,如氮能促进叶片的生长,使地下部的养分大量往地上部输送;钾能促进根茎的发育,增加须根数量;此外,中药材营养元素含量对药材品质存在显著影响。前人研究发现箭叶淫羊藿须根干质量随钾含量上升而增加,株高与镁含量呈显著正相关[27];研究表明彩色小麦产量和铜、锌、银含量呈极显著负相关[28]。研究发现人参根中氮、磷、铁元素与人参总皂苷和单体皂苷 Rg1 含量呈正相关[29];青蒿中青蒿素含量与 Fe 含量、Cu/Zn 之间存在相关性[30];相关研究表明磷、钾、铁、铜和硼可提高刺五加根中苷 E 的含量[31]。本研究表明(图 6),桃儿七产量与氮、磷、钾、硼呈显著正相关,根与磷、钾、硼存在正相关关系。木脂素类鬼臼毒素含量与钾、硼含量均呈极显著正相关,与铁、钙含量呈显著负相关;4′-去甲鬼臼毒素含量与硼含量呈显著正相关,与钙含量呈极显著负相关。黄酮类槲皮素含量与氮、磷、钾、硼含量存在正相关关系;山柰酚含量与氮、磷含量呈显著正相关,两者均与铁含量呈显著负相关。硼元素可促进细胞的伸长和分裂,在植物碳水化合物的运输和代谢具有重要作用[32],故在桃儿七生长中后期可适当施硼肥,以提高药效成分和干物质积累。关

于铁、钙元素对木脂素和黄酮类抑制作用的研究尚未有报道,后续可以进行相关试验去验证其原因。逐步回归分析表明磷、钾、硼元素是影响桃儿七品质的关键元素(表7)。综上,推测大量元素氮、磷、钾,微量元素硼对桃儿七产量及药效成分的积累具有促进作用;中量元素钙、微量元素铁对桃儿七药效成分的积累可能存在抑制作用。

因此,在进行桃儿七施肥时要注意施肥时期,可根据桃儿七不同时期营养元素比例来指导施肥,建议在旺盛生长期前施入大量元素氮磷钾,增叶期追施中微量元素硼,促进地上部分的生长,使地上部养分向根部转移,为桃儿七根部干物质及药效成分累积提供有利保障。故在生产管理上,应以氮肥和钾肥为主,适量施加磷肥、硼肥。

4 结 论

旺盛生长期是干物质与养分积累最关键的时期,吸收大量元素从多到少顺序为氮、钾、磷,硼元素也是影响桃儿七品质的关键元素,建议在旺盛生长期施入大量元素,增叶期追施硼元素。药效成分含量在枯萎休眠期达到最大值,建议在9月下旬至10月中旬采收。

参 考 文 献:

[1] 宋小妹, 刘海静. 太白七药研究与应用[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2011: 239-240.
SONG X M, LIU H J. Research and application of Taibai Qiyao[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2011: 239-240.

[2] 区智, 屈燕. 桃儿七国内外研究进展[J]. 北方园艺, 2013, (18): 183-185.
OU Z, QU Y. Research progress on sinopodophyllum emodi[J]. Northern Horticulture, 2013, (18): 183-185.

[3] 刘艳杰, 王健, 刘丽歌. 桃儿七化学成分和药理作用研究进展[J]. 北方药学, 2016, 13(4): 105-105, 106.
LIU Y J, WANG J, LIU L G. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Sinopodophyllum hexandrum*[J]. Journal of North Pharmacy, 2016, 13(4): 105-105, 106.

[4] 严淑婷, 樊浩, 李若岚, 等. 桃儿七化学成分及药理作用研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2020, 39(7): 43-50.
YAN S T, FAN H, LI R L, et al. Research progress on chemical constituents and pharmachological activities of *Sinopodophyllum hexandrum*[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2020, 39(7): 43-50.

[5] ISSELL B F. The Podophyllotoxin derivatives VP16-213 and VM26[J]. Cancer Chemotherapy and Pharmacology, 1982, 7(2/3): 73-80.

[6] GIRI A, LAKSHMI NARASU M. Production of podophyllotoxin from *Podophyllum hexandrum*: a potential natural product for clinically useful anticancer drugs[J]. Cytotechnology, 2000, 34(1/2): 17-26.

[7] 孙悦, 刘文伟, 张国霞, 等. 藏药桃儿七资源、化学成分及药理作用的研究进展[J]. 中国药物化学杂志, 2023, 33(9): 696-706.
SUN Y, LIU W W, ZHANG G X, et al. Recent progress on resources, chemical components and pharmacological effects of Tibetan medicine *Sinopodophyllum hexandrum*[J]. Chinese Journal of Medicinal Chemistry, 2023, 33(9): 696-706.

[8] 刘津, 于思礼, 马雅婷, 等. 天然木脂素的代谢工程和合成生物学研究进展[J]. 中草药, 2016, 47(14): 2556-2562.
LIU J, YU S L, MA Y T, et al. Research progress in metabolic engineering and synthetic biology for naturalLignan production[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2016, 47(14): 2556-2562.

[9] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典-一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 48.
National Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the people's republic of China: volume I[M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020: 48.

[10] KUMARI A, SINGH D, KUMAR S. Biotechnological interventions for harnessing podophyllotoxin from plant and fungal species: current status, challenges, and opportunities for its commercialization[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2017, 37(6): 739-753.

[11] 傅立国. 中国植物红皮书-稀有濒危植物[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 184-184.
FU L G. China plantredbook-rare and endangered plants[M]. Beijing: Science Press, 1992: 184-184.

[12] 国家环境保护局, 中国科学院植物研究所. 中国珍稀濒危保护植物名录-第1册[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 334-334.
State Bureau of Environment Protection, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences. List of rare and endangered plants in China[M]. Beijing: Science Press, 1987: 334-334.

[13] 葛阳, 康传志, 万修福, 等. 生产中氮肥施用及其对中药材产量和质量的影响[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(8): 1883-1892.
GE Y, KANG C Z, WAN X F, et al. Current situation of nitrogen application and its effects on yield and quality of Chinese materia medica[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(8): 1883-1892.

[14] 张亚琴, 邓秋林, 文秋姝, 等. 浅谈科学施肥在中药材生态种植中的作用与措施[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(20): 4846-4852.
ZHANG Y Q, DENG Q L, WEN Q S, et al. Brief discussion about role and measures of scientific fertilization in ecological cultivation of Chinese medicinal materials[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2020, 45(20): 4846-4852.

[15] 康传志, 刘思奇, 韩邦兴, 等. 中药生态农业的发展目标及策略[J]. 中国中药杂志, 2025, 50(1): 42-47.
KANG C Z, LIU S Q, HAN B X, et al. Development goals and strategies of ecological agriculture of Chinese materia medica[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2025, 50(1): 42-47.

[16] 张英英, 吴之涛, 杨宪忠, 等. 河西干旱区白芍养分吸收规律及其与药效成分积累的关系[J]. 西北植物学报, 2023, 43(12): 2100-2109.
ZHANG Y Y, WU Z T, YANG X Z, et al. Nutrient uptake characteristics and their relationships with accumulation of medicinal composition of *Paeonia lactiflora* in the arid region of Hexi[J]. Acta bo-

tanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2023, 43(12): 2100-2109.

[17] 张英英, 施志国, 魏廷邦, 等. 河西干旱区蒙古黄芪干物质积累及养分吸收规律研究[J]. 中药材, 2021, 44(1): 13-18.
ZHANG Y Y, SHI Z G, WEI T B, et al. Study on the rules of dry matter accumulation and nutrient absorption of *Astragalus membranaceus* var. Mongholicus in Hexi arid area[J]. Journal of Chinese medicinal materials, 2021, 44(1): 13-18.

[18] 王渭玲, 梁宗锁, 谭勇. 膜荚黄芪干物质累积及氮、磷、钾吸收规律的研究[J]. 中国中药杂志, 2007, 32(9): 789-793.
WANG W L, LIANG Z S, TAN Y. Study on accumulation of dry matter and aborption of N.P and K of *Astragalus membranaceus*[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2007, 32(9): 789-793.

[19] 李金鑫, 刘雨, 郭超伟, 等. 射干养分需求规律分析[J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(23): 128-134.
LI J X, LIU Y, GUO C W, et al. Nutrient requirement pattern of Belamcanda *chinensis*[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2022, 28(23): 128-134.

[20] 李林玉, 李庆堂, 高永萍, 等. 云当归干物质积累和养分吸收规律研究[J]. 中药材, 2022, 45(6): 1311-1315.
LI L Y, LI Q T, GAO Y P, et al. Study on dry matter accumulation and nutrient absorption of *Angelica sinensis*(Oliv.) diels[J]. Journal of Chinese medicinal materials, 2022, 45(6): 1311-1315.

[21] 张洁, 张莹, 贾小云, 等. 远志养分吸收规律及其与药效成分积累的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1230-1238.
ZHANG J, ZHANG Y, JIA X Y, et al. Nutrient uptake rules of *Polygala* tenuifolia and its relationship with accumulation of bioactive components[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2019, 25(7): 1230-1238.

[22] 刘盈盈, 许显莉, 冯海生, 等. 桃儿七质量标准的研究[J]. 中成药, 2021, 43(10): 2743-2749.
LIU Y Y, XU X L, FENG H S, et al. Quality standard for *Sinopodophyllum hexandrum*[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2021, 43(10): 2743-2749.

[23] 叶耀辉, 马越兴, 应亚宾, 等. 藏药桃儿七 HPLC 指纹图谱产地识别及质量评价[J]. 中国实验方剂学杂志, 2013, 19(24): 97-101.
YE Y H, MA Y X, YING Y B, et al. Study on tibetan medicine of *Sinopodophyllum hexandrum* fingerprint by HPLC for chemical region identification and quality evaluation[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2013, 19(24): 97-101.

[24] 李林玉, 马维思, 张宽华, 等. 云木香干物质及营养元素积累和分配规律[J]. 中国现代中药, 2021, 23(1): 106-110.
LI L Y, MA W S, ZHANG K H, et al. Accumulation and distribution of dry matter and nutrition element in *Aucklandia lappa*[J]. Modern Chinese Medicine, 2021, 23(1): 106-110.

[25] 王新月, 高旦, 杨泽敏, 等. 氮磷钾配施对川贝母产量和品质及养分吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024, (5): 54-62.
WANG X Y, GAO D, YANG Z M, et al. Effects of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium on yield, quality and nutrient absorption of *Fritillaria cirrhosa* D. Don[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2024, (5): 54-62.

[26] 柳洪鹃, 史春余, 柴沙沙, 等. 不同时期施钾对甘薯光合产物运转动力的调控[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 171-180.
LIU H J, SHI C Y, CHAI S S, et al. Effect of different potassium application time on the vigor of photosynthate transportations of edible sweet potato (*Ipomoea Batata* L.)[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21(1): 171-180.

[27] 雷荣, 王华磊, 汪卓逸, 等. 15 份淫羊藿属种质资源评价[J]. 种子, 2024, 43(2): 66-79.
LEI R, WANG H L, WANG Z Y, et al. Evaluation of 15 germplasm resources of *Epimedium*[J]. Seed, 2024, 43(2): 66-79.

[28] 张正斌, 徐萍, 李奉令, 等. 彩色小麦农艺性状和微量营养元素相关回归分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(10): 1669-1678.
ZHANG Z B, XU P, LI F L, et al. Correlation of agronomic traits and micronutrient elements of colored wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(10): 1669-1678.

[29] 左湘熙, 孙海, 钱佳奇, 等. 东北不同产地农田栽培人参品质与参根矿质元素的相关分析[J]. 吉林农业大学学报, 2022, 44(3): 307-312.
ZUO X X, SUN H, QIAN J Q, et al. Correlation analysis of ginseng quality and ginseng root mineral elements cultivated in farmland of different producing areas in Northeast China[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2022, 44(3): 307-312.

[30] 周蓓, 武暄, 蒋勇, 等. 重庆产青蒿药材中微量元素与有效成分含量评价及其相关性分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, (10): 159-164.
ZHOU B, WU X, JIANG Y, et al. Evaluation and correlation analysis of trace elements and effective components in *Artemisia annua* L. from Chongqing[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2013, (10): 159-164.

[31] 孟祥才, 于冬梅, 孙晖, 等. 氮、磷、钾和微量元素对栽培刺五加药材质量影响的研究[J]. 现代中药研究与实践, 2010, 24(3): 8-11.
MENG X C, YU D M, SUN H, et al. Effect of N,P,K and trace element on medicinal materials quality the origin from *Acanthopanax senticosus*[J]. Research and Practice of Chinese Medicines, 2010, 24(3): 8-11.

[32] 陆景陵. 植物营养学-上册[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 83-86.
LU J L. Plant nutrition (volume I)[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003: 83-86.