果 树 学 报 2022,39(2):211-220
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20210402

核桃树体生物量构成及需肥规律需肥量研究

张建英,张莹莹,毛向红

(河北省林业和草原科学研究院•河北省林木良种技术创新中心,石家庄 050061)

摘 要:【目的】通过核桃树体生物量构成调查和矿质元素含量的测定,明确不同树龄核桃树年需肥量和果实发育关键期的需肥比例,为核桃园精准施肥提供理论依据。**【方法】**采用彻底刨根分解取样的方法测定不同树龄核桃生物量构成,采用GB 5009.5—2016(第一法)和GB 5009.5—2016(第二法)测定6年生核桃树体不同部位矿质元素含量,计算得出不同树龄核桃树各种矿质元素的年积累量;测定果实5个发育关键期当年生器官的矿质元素含量,明确核桃树体年生长发育过程中的矿质元素需求比例。**【结果】**随着树龄的增长,核桃树体生物量和矿质元素含量逐年增加,增加曲线均符合多项式方程,通过多项式方程,可以得到不同矿质元素的年积累量;核桃果实不同发育关键期对矿质元素的需求比例不同,花期对N、P、K、Fe、Mn、Zn、Cu、Mg 8种元素需求量大,硬核期对Ca、Mg和B需求量大,脂肪转化期对B需求量大,果实成熟期对Mg需求量大。**【结论】**明确了不同树龄核桃树的矿质元素年增加量和不同发育关键期对矿质元素的需求规律,从而求得不同树龄核桃树不同发育关键期的矿质元素含量。

关键词:核桃;生物量;年需肥量;需肥规律;多项式方程

中图分类号:S664.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2022)02-0211-10

Study on biomass composition, fertilizer requirement and fertilizing amount in walnut

ZHANG Jianying, ZHANG Yingying, MAO Xianghong

(Hebei Academy of Forestry and Grassland Science/Hebei Technological Innovation Center of Fine Forest Species, Shijiazhuang 050061, Hebei, China)

Abstract:【Objective】 Through the investigation of biomass of 1 to 12-year-old walnut tree and the determination of mineral element contents in different parts of a tree at 5 critical periods of fruit development, the annual fertilizer requirement of walnut tree with different ages and the fertilizer-applying ratio at critical periods of fruit development were determined, which could provide theoretical basis for precision fertilization in walnut orchards.【Methods】 The whole trees of different ages were discomposed into different parts and sampled respectively to determine the biomass composition. Using the 6-year-old walnut tree as experimental material, the contents of 10 mineral elements in 10 organs including leaf, shoot, perennial branch, trunk, fibrous root, lateral root, main root, green husk, seed shell and kernel were determined to calculate the accumulation and current year contents. The contents of mineral elements in inflorescence, branch and fruit at 5 critical periods of fruit development were determined to analyze the change of mineral elements during the annual growth and development and the definite demand ratio of mineral elements at different development periods. Nitrogen was determined by GB 5009.5—2016 (first method), and other elements were determined by GB 5009.5—2016 (second method). 【Results】 The biomass increased with tree age, the increasing curve of which accorded with the polynomial equation $y=-0.001\ 4x^6+0.05x^5-0.652\ 4x^4+3.867\ 9x^3-9.281\ 2x^2+14.302x-6.780\ 8$. The increasing curves of mineral elements in terms of different tree ages also accorded with polynomial equations. The polynomial equations of nitrogen, phosphorous and potassium, which are wildly used in pro-

收稿日期:2021-09-09 **接受日期:**2021-11-02

基金项目:河北省重点研发计划项目(20326334D);核桃产业国家创新联盟

作者简介:张建英,女,正高级农艺师,从事经济林育种与栽培研究工作。Tel:13933097828,E-mail:lkyjjl@163.com

duction, are as follows: y(N)=−0.008 7x^6+0.313 9x^5−4.186 8x^4+25.533x^3−64.556x^2+121.64x−64.423(R^2=0.999 8); y(P)=−0.001 3x^6+0.045 4x^5−0.577 9x^4+3.307 8x^3−7.511x^2+13.003x−6.294 9(R^2=0.999 7); y(K)=−0.005x^6+0.207 8x^5−3.199 4x^4+21.998x^3−60.511x^2+125.7x−77.014(R^2=0.999 8); In the annual production cycle of walnut, the contents of mineral elements at 5 critical periods of fruit development (flowering stage, young fruit expanding stage, shell hardening stage, fat transforming stage, fruit ripening stage and post ripening stage) were different. In current year's organs, the content of K was the highest, and the contents of N and Ca were the second and third, respectively. The content ratio of K element at five periods was 1.82∶1.10∶1.17∶1.00∶1.62 with the highest content at flowering stage and the lowest content at fat transforming stage. The content ratio of N element at five periods was 2.23∶1.28∶1.30∶1.00∶1.16 with the highest content at flowering stage and the lowest content at fat transforming stage. The content ratio of Ca element at five periods was 1.15∶1.03∶1.57∶1.00∶1.13 with the highest content at shell hardening stage and the lowest content at fat transforming stage. The content ratio of P element at five periods was 3.16∶1.56∶1.13∶1.08∶1.00 with the highest content at flowering stage and the lowest content at fruit ripening stage. The content ratio of Mg element at five periods was 1.40∶1.05∶1.41∶1.00∶1.35 with little difference at flowering stage, shell hardening stage and fruiting ripening stage.【Conclusion】By measuring the biomass composition of walnut tree of different ages and the mineral element contents at critical periods of fruit development, the annual increasing amount of mineral element of walnut tree of different age and the requirement of mineral element at different development periods can be determined, and the content of mineral element of walnut of different age and different critical periods of development can be obtained.

Key words: Walnut; Biomass; Fertilizer needs; Fertilizer requirement; Polynomial equation

近年来在国家政策的大力支持下，全国核桃栽培面积急剧增加，但我国核桃栽培在相当长的时期内都是粗放管理，进入品种化栽培时间较短，在肥料利用方面更是浪费严重。为了保证核桃高产优质，降低成本，提高经济价值，合理施肥成为栽培管理中的关键技术。合理施肥是影响果树产量和品质的关键技术措施，充分了解果树生物量构成特点和营养特性是进行合理施肥的基础和必要条件[1]。

在树体生物量构成和矿质元素积累研究方面对苹果、梨的研究比较多而且成熟，樊红柱等[2-4]以富士苹果树为试材，对苹果树体生物量构成及不同器官氮、磷、钾含量和养分吸收累积量的变化规律进行了研究。苏艳丽等[5]以中梨1号、中梨4号和早酥蜜3个新优早熟梨品种为研究对象，对果实发育期间，果实、叶片和土壤中N、P、K元素含量的变化规律和它们之间的相关性进行了研究和分析。姜喜等[6]以香梨、早酥梨和新梨7号为材料，研究了在果实生长发育期间，Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu元素的含量变化。目前在核桃营养研究方面主要集中在叶片矿质营养含量动态、营养诊断等方面[7-9]。浙江农林大学的夏国华等[10]、山西农业大学的冀爱青等[11]、河北农业大学的史永江等[12]和郭向华等[13]都做过核桃叶片、果实矿质元素含量以及变化规律的研究，赵明范[14]在确定核桃树体营养诊断指标时涉及到钙和镁，张建英等[15]做过关于核桃果实发育关键期矿质元素含量的变化规律的研究。郭向华等[13]在对香玲核桃叶片中矿质元素含量的研究中涉及到了微量元素，但关于核桃各器官生物量构成和营养累积特性的研究鲜见报道[16-17]。

笔者旨在通过试验调查和检测，掌握不同树龄核桃树的生物量构成特点，揭示核桃果实发育关键期营养元素的积累规律，明确核桃不同物候期的需肥规律，为核桃精准施肥提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

试验于2017年、2018年在河北省林业和草原科学研究院核桃示范园和资源圃进行。试验材料为辽宁1号核桃，砧木为核桃(*J. regia* L.)，株行距4 m×5 m，核桃园管理水平中等。河北省林业和草原科学研究院地处河北省平原地区，砂壤土，暖温带大陆性季风气候区，具有光照充足、雨热同季、四季分明，春季干

燥多风、夏季炎热多雨、秋季天高气爽、冬季少雪寒冷的特点。年平均气温12.9 ℃,极端最低气温-26.5 ℃,极端最高气温42.7 ℃,无霜期240.0 d。年均日照时数2200.0 h,平均日照6.0 h左右。平均年降水量537.2 mm,主要集中在7—9月份,约占全年降水量的70.0%左右。

1.2　方法

1.2.1　*核桃树体生物量构成*　(1)目标树确定。2017年分别调查20株1~12年生核桃树,品种为辽宁1号,计算干径、树冠、树高平均值,按照平均值选各树龄代表植株,1~6年生选3株树,单株小区,3次重复,7~12年生不设重复。

(2)分解树体并称重。取样方法参照梁智等[18]彻底刨根、分解取样的方法进行,果实成熟期将试验树彻底刨根、分解取样:把每株树分解为叶片(带叶柄)、新梢、多年生枝、主干、须根(直径≤ 0.2 cm)、侧根(直径> 0.2 cm)、主根、青皮、种壳、种仁10个部位,分别称量鲜质量。

(3)干质量计算。每个部分取少量样称量鲜质量和干质量。叶片、新梢、须根、青皮、种壳、种仁随机取样,3次重复,取平均值;主根和主干截取中间粗度的横截面;侧根和多年生枝选取中间粗度的作为测试样。105 ℃杀青30 min后、80 ℃烘8 h后称重,计算水分系数。

水分系数=干质量/鲜质量,

干质量=器官生物质量(鲜质量)×水分系数。

1.2.2　*矿质元素积累量测定*　(1)矿质元素含量测定。以6年生植株为矿质元素含量测定样品,从3株树中随机取样,然后混匀。测定叶片、新梢、多年生枝、主干、须根、侧根、主根、青皮、种壳、种仁10个器官中大量元素N、P 、K、Ca、Mg和微量元素Fe、B、Mn、Zn、Cu每kg中的含量。

N的测定用GB 5009.5—2016(第一法),其他元素的测定采用GB 5009.5—2016(第二法)。测定委托单位:北京市营养源研究所。

(2)元素积累量计算。

树体元素积累量=器官干质量×元素含量,

当年元素积累量=树体元素积累量-上一年树体元素积累总量。

1.2.3　*核桃发育关键期需肥规律研究*　从花期开始的5个发育关键期在树冠中部东南西北4个方向的结果枝上采样(表1),花期采集雌、雄花序,其他发育关键期采集10根新梢、10枚复叶、10个果实,分别烘干粉碎装袋。生长季幼果整体烘干粉碎,成熟期果实青皮、种壳和种仁分别烘干粉碎装袋,分别测定不同部位的10种矿质元素含量。

表1　样品采集

Table 1　Sample information

果实发育关键期 The critical period of fruit development	采样时间 Sampling time	采集部位 Sampling site
花期 Flowering stage	2018-04-01、2018-04-23	雄花序和结果枝 Male inflorescence and fruit branch
幼果膨大期 Young fruit expanding stage	2018-05-22	枝条、叶片、幼果 Leaf,Branch,Young fruit
硬核期 Shell-hardening stage	2018-06-29	枝条、叶片、幼果 Leaf,Branch,Young fruit
脂肪转化期 Fat transformation stage	2018-07-29	枝条、叶片、幼果 Leaf,Branch,Young fruit
果实成熟期 Fruit ripening stage	2018-08-29	枝条、叶片、成熟果实 Leaf,Branch,Ripe fruit

2　结果与分析

2.1　不同树龄核桃树生物量构成

由表2、图1看出,1~12年生核桃树体发育可分为3个阶段:第1阶段为1~3年生,树体各器官干质量相差不大,干质量最大的器官为叶片;第2阶段为4~8年生,各器官干质量分布量差距加大,最大干质量器官为主干,其次为多年生枝;第3阶段为9~12年生,最大干质量器官为多年生枝,其次为主干。树体从1~12年生干质量的增加符合多项式曲线。

从产量(图2)来看,1~12年生核桃树的生长发育可以分为2个阶段,1~8年生产量增加相对较迅速,从第9年开始,产量增加相对较为缓慢。

2.2　不同树龄核桃树10种矿质元素积累量

2.2.1　*矿质元素含量测定*　以6年生树作为样本,对其10个部位的矿质元素含量进行测定,测定结果见表3。

核桃树体5种大量元素的含量排序为K > Ca > N > Mg > P。K主要分布在果实青皮中,占到总含量的75%;Ca和Mg在叶片中的含量最高,分别占到25%和31%;N和P以种仁含量最高,分别占到25%

表 2 不同树龄核桃干质量

Table 2 Dry weight at different tree ages

kg

器官 Organ	1年生 1 year old	2年生 2 years old	3年生 3 years old	4年生 4 years old	5年生 5 years old	6年生 6 years old	7年生 7 years old	8年生 8 years old	9年生 9 years old	10年生 10 years old	11年生 11 years old	12年生 12 years old
复叶 Compound leaf	0.52	1.27	2.02	2.73	3.44	4.15	4.40	4.64	4.94	5.23	5.83	6.42
1年生枝 Annual branch	0.48	1.11	1.74	2.21	2.68	3.15	2.34	1.52	1.72	1.91	2.03	2.14
多年生枝 Perennial branch	0.00	1.01	2.01	5.18	8.34	11.51	15.70	19.89	34.74	49.58	66.34	83.09
主干 Trunk	0.00	0.94	1.88	7.74	13.60	19.46	23.94	28.42	33.07	37.72	50.30	62.87
主根 Main root	0.18	0.97	1.76	3.03	4.30	5.57	6.96	8.35	11.42	14.48	18.87	23.25
侧根 Lateral root	0.09	0.69	1.28	2.30	3.31	4.33	7.97	11.61	14.45	17.28	20.30	23.32
须根 Fibrous root	0.05	0.48	0.91	1.00	1.09	1.18	1.75	2.31	3.16	4.00	7.59	11.18
青皮 Green husk	0.00	0.35	0.70	1.41	2.11	2.82	3.53	4.23	4.49	4.75	5.00	5.24
种壳 Seed shell	0.00	0.33	0.65	1.22	1.78	2.35	3.18	4.10	4.10	4.20	4.17	4.14
种仁 Kernel	0.00	0.45	0.9	1.70	2.49	3.28	3.92	4.55	4.74	4.92	5.32	5.72
合计 Total	1.32	7.60	13.85	28.52	43.14	57.8	73.69	89.62	116.83	144.07	185.75	227.37

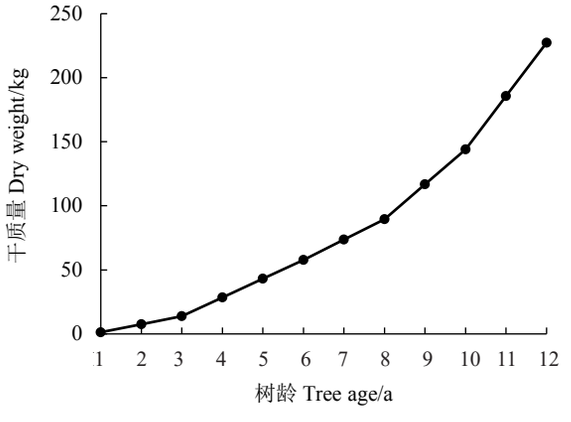

图 1 核桃树体干质量随树龄增加曲线

Fig. 1 Curve of walnut dry weight increasing with tree age

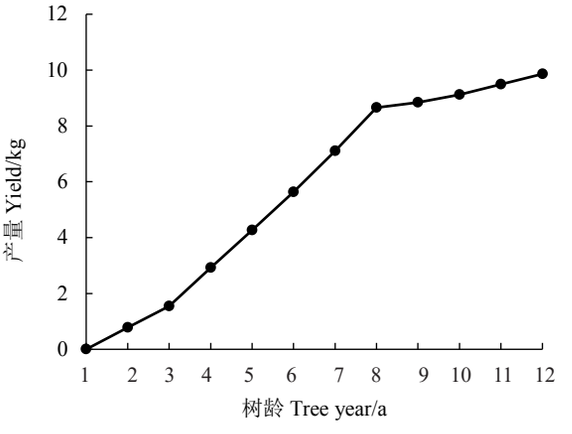

图 2 不同树龄核桃产量变化曲线

Fig. 2 Yield curve of walnut tree from 1 to 12-year- old

和26%。

核桃树体中5种微量元素的含量排序为Fe > B > Mn > Zn > Cu。Fe和B主要存在与叶片中，占到总量的28%和36%；Mn在叶片和须根中含量较高，在此2种器官中的含量不相上下，在此2种器官中的含量占到51%；Zn主要存在于种仁和1年生枝条中，在种仁和1年生枝条中的含量占总含量的35%；Cu主要存在于多年生枝中，分布比例为34%。

2.2.2 不同树龄核桃树10种矿质元素积累量和变化曲线 （1）不同树龄核桃树矿质元素积累量。由表3和表4得出1~12年生核桃树矿质元素积累量。大量元素中以Ca元素积累量最高，其次是N和K元素，Mg和P元素的积累量较少。微量元素中以Fe元素积累最高，远远高于Mn、Cu、Zn、B 4种微量元素。

由表4可知，1~12年生核桃树的元素积累量按照5种大量元素含量的高低可以分为3个阶段，第1阶段为1~3年生，这个阶段5种大量元素的含量排序为Ca > N > K > Mg > P，第2阶段为4~8年生，这个阶段5种大量元素含量的排序为Ca > K > N > Mg >P，第3阶段为9~12年生，这个阶段5种大量元素含量的排序与第1阶段相同，为Ca > N > K > Mg > P。

不同年龄段微量元素的含量排序一致，均为Fe > B > Mn > Zn > Cu。

（2）矿质元素积累量变化曲线。矿质元素的含量随着树龄的增加呈逐渐增加的趋势，不同元素增加量不同，见图3和图4。Ca元素含量在8~12年生

表 3　6 年生核桃树不同器官 10 种矿质元素含量

Table 3　Contents of 10 mineral elements in different organs of 6-year-old walnut tree

器官 Organ	氮 N/（g·kg^{-1}）	磷 P/（g·kg^{-1}）	钾 K/（g·kg^{-1}）	钙 Ca/（g·kg^{-1}）	镁 Mg/（g·kg^{-1}）	铁 Fe/（mg·kg^{-1}）	锰 Mn/（mg·kg^{-1}）	铜 Cu/（mg·kg^{-1}）	锌 Zn/（mg·kg^{-1}）	硼 B/（mg·kg^{-1}）
复叶 Compound leaf	14.44	1.44	7.83	26.85	5.97	315.47	68.34	6.09	19.50	147.53
1 年生枝 Annual branch	7.43	1.50	3.14	14.17	2.70	67.36	30.06	1.59	28.28	37.19
多年生枝 Perennial branch	6.54	1.01	1.89	13.59	1.78	72.89	27.44	35.69	27.90	27.69
主干 Trunk	4.62	0.59	1.92	7.23	0.99	77.05	20.59	4.60	9.10	19.98
主根 Main root	5.11	1.03	2.61	4.33	0.66	138.14	8.75	3.13	9.84	14.68
侧根 Lateral root	8.90	0.84	3.19	7.70	0.63	145.15	12.43	5.25	8.02	26.13
须根 Fibrous root	11.59	0.94	4.62	18.00	1.96	147.45	69.87	19.94	17.06	39.41
青皮 Green husk	13.67	1.38	111.90	10.61	2.73	101.14	7.92	10.64	17.67	61.59
种壳 Seed shell	5.23	0.29	3.90	2.44	0.18	21.26	3.40	3.11	7.25	17.31
种仁 Kernel	25.75	3.21	6.35	2.49	1.81	33.95	20.68	16.19	34.94	13.63
平均值 Average value	10.33	1.22	14.74	10.74	1.94	111.99	26.95	10.62	17.96	40.51

表 4　不同树龄核桃树矿质元素积累量

Table 4　Accumulation of mineral elements in walnut tree at different ages

树龄 Tree age	氮 N/g	磷 P/g	钾 K/g	钙 Ca/g	镁 Mg/g	铁 Fe/mg	锰 Mn/mg	铜 Cu/mg	锌 Zn/ mg	硼 B/mg
1 年生 1 year old	13.38	1.78	6.57	23.14	4.67	241.68	56.15	5.96	27.06	101.53
2 年生 2 years old	72.19	9.11	67.36	94.02	17.14	982.88	230.81	77.92	140.24	359.62
3 年生 3 years old	131.00	16.45	128.15	164.91	29.61	1724.09	405.47	149.87	253.42	617.72
4 年生 4 years old	242.45	30.79	246.16	301.97	51.70	3110.15	729.95	328.44	489.17	1 058.15
5 年生 5 years old	353.30	45.08	362.91	438.66	73.73	4 492.48	1 053.71	506.30	723.96	1 497.11
6 年生 6 years old	464.49	59.39	480.86	575.70	95.81	5 878.20	1 377.98	684.70	959.36	1 937.40
7 年生 7 years old	586.42	73.67	600.72	715.35	114.51	7 465.26	1 695.84	910.12	1 191.89	2 352.91
8 年生 8years old	708.35	87.95	720.59	855.01	133.20	9 052.32	2 013.71	1 135.54	1 424.42	2 768.42
9 年生 9 years old	892.16	113.71	812.11	1 154.83	173.04	11 593.05	2 670.14	1 736.26	1 971.28	3 495.80
10 年生 10 years old	1 075.97	139.48	903.62	1 454.65	212.89	14 133.78	3 326.58	2 336.97	2 518.13	4 223.18
11 年生 11 years old	1 357.47	176.90	1 031.95	1 901.26	272.24	18 130.57	4 426.23	3 106.76	3 261.58	5 335.22
12 年生 12 years old	1 638.98	214.31	1 160.29	2 347.86	331.60	22 127.36	5 525.87	3 876.55	4 005.04	6 447.26

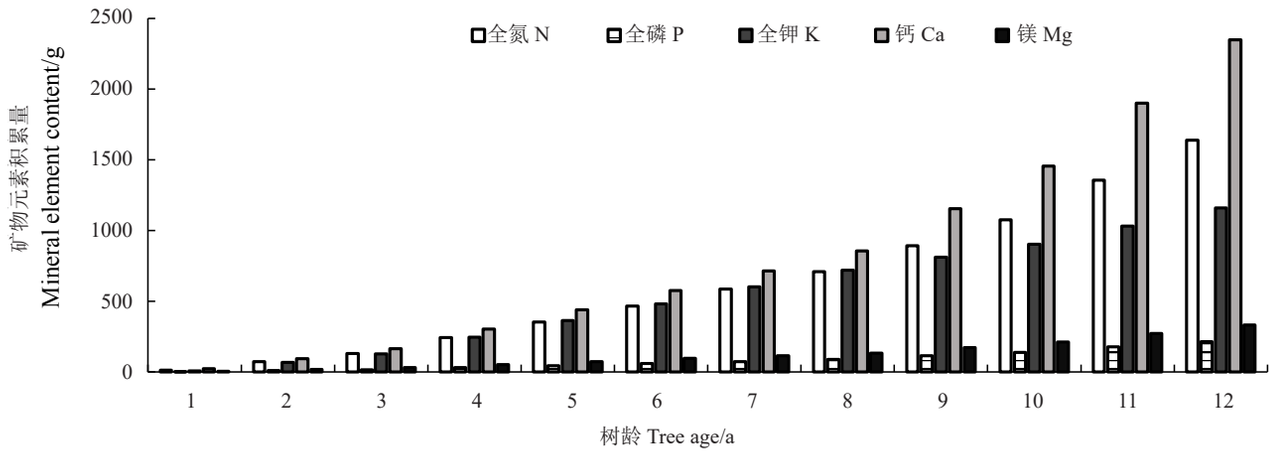

图 3　5 种大量元素随树龄增加曲线

Fig. 3　The curve of 5 major element contents increasing with tree age

中的增加速度大于 1~8 年生；N 和 K 元素积累量的变化在 1~8 年生核桃树中相差不大，8 年生以后 N 元素积累量的增加速度超过了 K 元素；Fe 元素积累量在 1~12 年生树体中增加都比较迅速；Mg、P 和 Mn、Cu、Zn、B 4 种微量元素含量的增加趋势一直比较平稳。

随着树龄的增长，核桃树体矿质元素的增长曲线符合多项式曲线，多项式方程分别为：

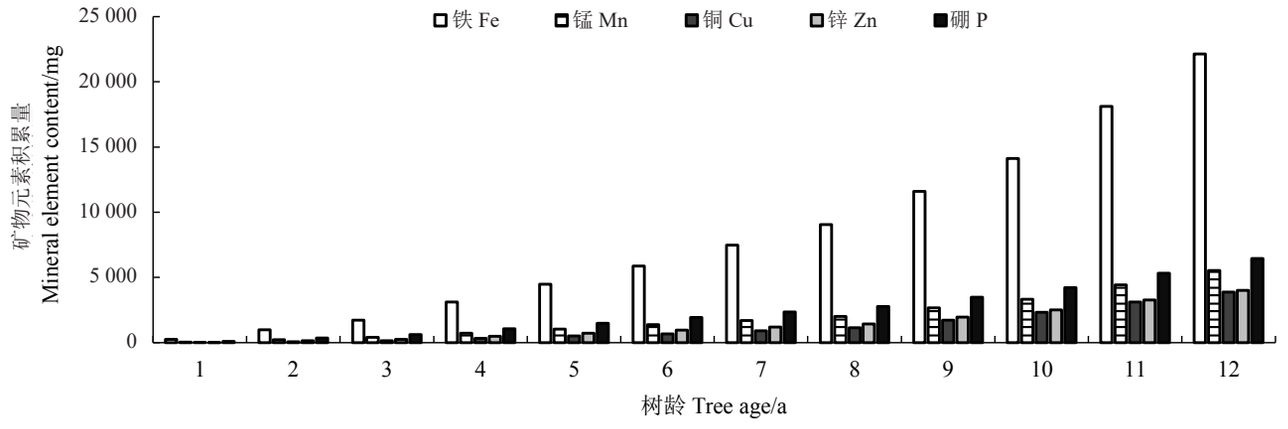

图 4 5 种微量元素随树龄增加曲线变化

Fig. 4 The curve of 5 trace element contents increasing with tree age

y(N)=−0.008 7x^6+0.313 9x^5−4.186 8x^4+25.533 0x^3−64.556 0x^2+121.640 0x−64.423 0(R^2=0.999 8)，

y(P)=−0.001 3x^6+0.045 4x^5−0.577 9x^4+3.307 8x^3−7.511 0x^2+13.003 0x−6.294 9(R^2=0.999 7)，

y(K)=−0.005 0x^6+0.207 8x^5−3.199 4x^4+21.998 0x^3−60.511 0x^2+125.700 0x−77.014 0(R^2=0.999 8)，

y(Ca)=−0.014 9x^6+0.508 8x^5−6.303 0x^4+35.084 0x^3−78.387 0x^2+129.280 0x−54.998 0(R^2=0.999 7)，

y(Mg)=−0.002 5x^6+0.086 5x^5−1.098 6x^4+6.285 3x^3−15.000x^2+25.807 0x−11.098 0(R^2=0.999 6)，

y（Fe）=− 0.116 6x^6 + 4.195 9x^5− 55.542 0x^4 + 338.320 0x^3−870.410 0x^2+1628.400 0x−792.640 0(R^2=0.999 8)，

y（Mn）=− 0.041 7x^6 + 1.481 9x^5− 19.358 0x^4 + 116.260 0x^3−307.280 0x^2+512.330 0x−244.200 0(R^2=0.999 6)，

y(Cu)=−0.016 2x^6+0.462 3x^5−4.133 6x^4+10.422 0x^3+41.583 0x^2−104.460 0x+67.486 0(R^2=0.999 4)，

y(Zn)=−0.024 1x^6+0.790 5x^5−9.199 0x^4+45.957 0x^3−74.255 0x^2+103.790 0x−35.056 0(R^2=0.999 5)，

y(B)=−0.0419x^6+1.491 5x^5−19.499 0x^4+116.110 0x^3−294.270 0x^2+553.010 0x−250.980 0(R^2=0.999 8)。

2.3 核桃年生长周期需肥规律研究

核桃年生长周期中有5个关键期，分别为花期、幼果膨大期、硬核期、脂肪转化期和果实成熟期，在这5个时期采集当年器官测定其矿质元素含量，结果见表5。P、Fe、Cu、Zn 4种元素在雄花序中含量最高，N和Mn在刚萌发时的结果枝中含量最高，Ca、Mg和B在果实成熟期的叶片中含量最高，K元素含量在成熟期果实的青皮中含量最高。K和B分别在成熟期枝条和种仁中含量最低，其他8种矿质元素均在种壳中含量最低。

2.3.1 *核桃发育期不同器官矿质元素含量* 以核桃不同发育期中枝条、叶片和果实中矿质元素含量的平均值作为不同器官矿质元素的含量，对矿质元素在不同器官中的含量进行分析。

由图5可知，核桃当年器官中含氮、钾和钙较多，含磷和镁很少。矿质元素在各器官中的含量差别也很大，氮在叶片中含量(w，后同)最高，为17.40 g·kg^{-1}，枝条中含量较低，为10.15 g·kg^{-1}；磷在核桃叶片、枝条和果实中含量很少而且含量相近；钾在核桃果实中含量最高为26.15 g·kg^{-1}，在枝条中含量低为12.13 g·kg^{-1}；钙在叶片含量最高为15.62 g·kg^{-1}，在果实中含量最低为5.35 g·kg^{-1}；镁在叶片含量较高为3.14 g·kg^{-1}，在果实中含量最低为1.54 g·kg^{-1}。叶片中除了钾的含量低于果实中外，氮、磷、钙和镁的含量均最高。

由图6可知，核桃中含铁量较高，而且主要存在于叶片当中，含量达到了249 mg·kg^{-1}，其次是硼，叶片中含硼量最高为102.19 mg·kg^{-1}。

2.3.2 *核桃不同发育期同一器官矿质元素含量的变化* 以核桃中含量较高的氮、钾、钙和铁为例对核桃发育器官中氮、钾、钙和铁含量的变化进行分析。

由图7可以看出，在核桃整个年发育周期中，氮在叶片中含量的变化比较平稳，呈现逐渐降低的趋势，在膨大期时含量最高为19.12 g·kg^{-1}，然后缓慢降低，到脂肪转化期降到16.33 g·kg^{-1}，到果实成熟期稍微有所增加；氮在枝条当中的含量变化比较剧烈，在膨大期含量为9.63 g·kg^{-1}，然后迅速增加，到硬核期增加到17.71 g·kg^{-1}，数值达到最高，然后又

表5　核桃发育关键期当年器官矿质元素含量

Table 5　The mineral element contents of current-year organs in critical period of fruit development

发育期与器官 Developmental stage and organs	氮N/（g·kg^{-1}）	磷P/（g·kg^{-1}）	钾K/（g·kg^{-1}）	钙Ca/（g·kg^{-1}）	镁Mg/（g·kg^{-1}）	铁Fe/（mg·kg^{-1}）	锰Mn/（mg·kg^{-1}）	铜Cu/（mg·kg^{-1}）	锌Zn/（mg·kg^{-1}）	硼B/（mg·kg^{-1}）
雄花序 Male inflorescence	24.79	5.06	33.05	8.28	2.48	517.41	44.83	20.90	87.47	44.55
结果枝 Fruit branch	27.39	4.43	28.98	11.99	2.81	236.27	67.18	15.12	66.92	36.87
膨大期叶片 Leaf in expanding stage	19.12	2.33	12.95	9.78	1.67	171.40	34.54	9.65	29.89	60.71
膨大期枝条 Branch in expanding stage	9.63	2.39	22.00	11.17	2.53	68.50	13.92	10.51	30.20	24.59
膨大期果实 Fruit in expanding stage	16.17	2.31	21.39	6.31	1.78	54.90	17.41	9.89	28.78	28.30
硬核期叶片 Leaf in Shell-hardening stage	17.41	1.80	22.66	20.50	3.86	397.11	46.30	19.93	29.47	102.97
硬核期枝条 Branch in Shell-hardening stage	17.71	1.62	16.30	14.92	2.62	82.36	14.54	7.71	28.63	30.91
硬核期果实 Fruit in Shell-hardening stage	10.53	1.65	20.91	5.92	1.52	49.26	13.11	9.49	19.02	27.44
转化期叶片 Leaf in Fat transforming stage	16.33	1.81	22.42	9.74	1.64	202.27	35.04	12.29	22.36	105.59
转化期枝条 Branch in Fat transforming stage	6.66	1.36	7.02	12.67	2.72	49.81	14.67	4.52	25.11	28.20
转化期果实 Fruit in Fat transforming stage	12.19	1.68	21.60	4.00	1.30	37.65	11.97	8.81	16.92	31.98
成熟期叶片 Leaf in Fruit ripening stage	16.73	1.54	12.51	22.44	5.38	225.26	52.14	9.49	23.79	139.47
成熟期枝条 Branch in Fruit ripening stage	6.58	1.09	3.19	11.92	2.63	64.13	19.41	3.59	23.79	27.39
青皮 Green husk	13.67	1.38	111.90	10.61	2.73	101.14	7.92	10.64	17.67	61.59
种壳 Seed shell	5.23	0.29	3.90	2.44	0.18	21.26	3.40	3.11	7.25	17.31
种仁 Kerel	25.75	3.21	6.35	2.49	1.81	33.95	20.68	16.19	34.94	13.63

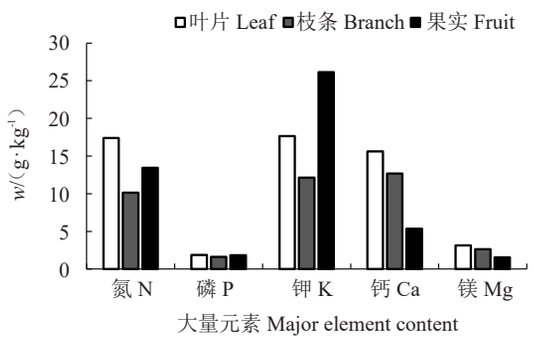

图5　不同器官大量元素含量

Fig. 5　Major element contents in different organs

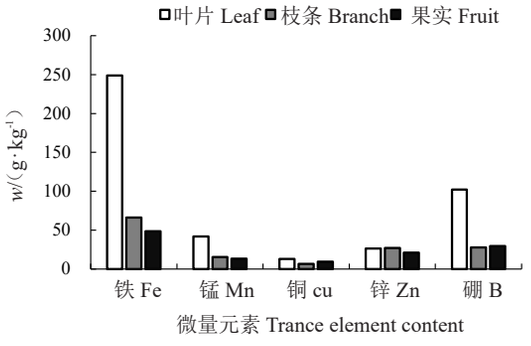

图6　不同器官微量元素含量

Fig. 6　Trance element contents indifferent organs

迅速降低，到脂肪转化期含量降到6.66 g·kg^{-1}；氮在果实中的含量在膨大期最高为16.17 g·kg^{-1}，然后下降到硬核期的10.53 g·kg^{-1}，然后又缓慢升高，到果实成熟期达到14.88 g·kg^{-1}。

图8表明，钾在叶片中的含量随着树体的发育呈两头高中间低的趋势，果实膨大期和成熟期叶片中钾的含量低于硬核期和脂肪转化期叶片中钾的含量；钾在枝条中的含量是逐渐降低的趋势，膨大期含量最高为22.00 g·kg^{-1}，然后随着果实的发育含量逐渐减少，到果实成熟期减少到3.19 g·kg^{-1}；膨大期、硬核期和脂肪转化期果实中钾的含量变化比较平稳，到果实成熟期含量迅速增加到40.72 g·kg^{-1}。

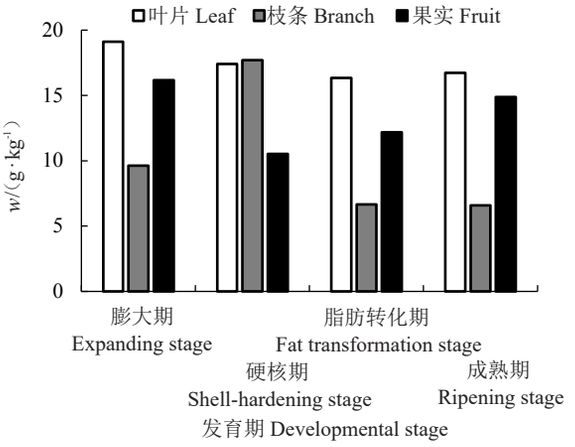

图7　氮在不同发育器官中含量的变化

Fig. 7　Changes of N in different developmental organs

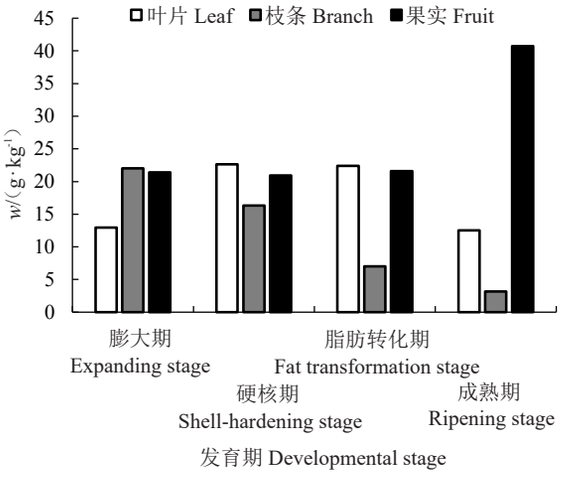

图 8 钾在不同发育器官中含量的变化

Fig. 8 Changes of K in different developmental organs

如图9所示，钙在叶片中含量的变化比较大，膨大期含量较低，到硬核期迅速增加到20.50 mg·kg^{-1}，脂肪转化期又迅速降低到接近膨大期的水平，然后又迅速增加，果实成熟期含量达到最高22.44 mg·kg^{-1}；

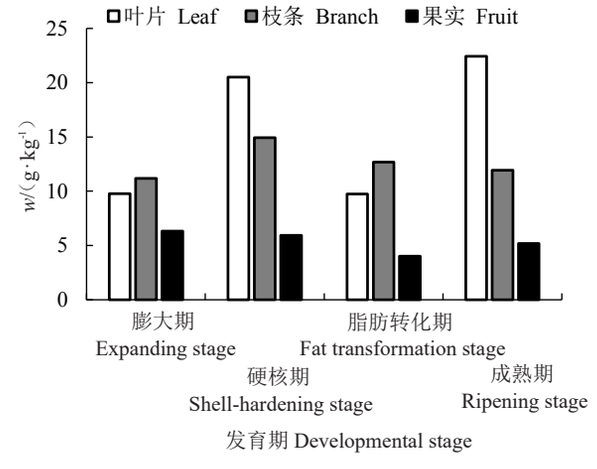

图 9 钙在不同发育器官中含量的变化

Fig. 9 Changes of Ca in different developmental organs

钙在枝条和果实中含量的变化比较平稳，枝条中硬核期含量较高，果实中脂肪转化期含量最低。

如图10所示，铁在叶片中的含量以硬核期最高，达到397.11 mg·kg^{-1}，膨大期含量最少，脂肪转化期和果实成熟期含量略高于膨大期；铁在枝条和果实中含量较少，而且含量变化不大。

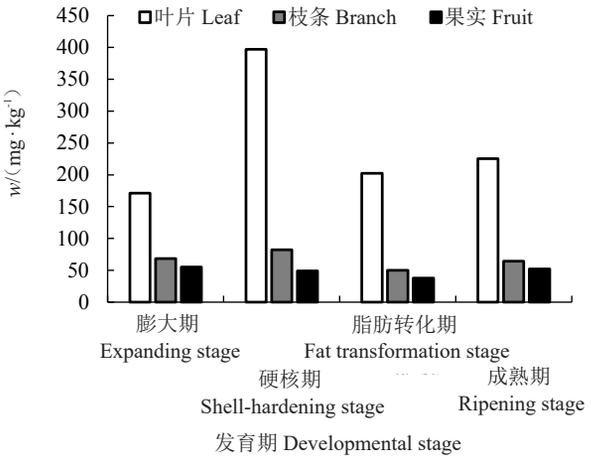

图 10 铁在不同发育器官中含量的变化

Fig. 10 Changes of Fe in different developmental organs

2.3.3 *果实发育关键期矿质元素需求比例* 每种矿质元素在不同的发育期含量是有差别的，说明在不同时期对不同矿质元素的需求量是不同的，以各矿质元素在发育期的最低含量作为分母，各发育期的含量除以最低含量得到表6。

由表6可以看出，N、P、K、Fe、Mn、Zn、Cu 7种元素含量最高的时期是均在花期，说明花期对矿质元素的需求种类多而且量大；Ca含量最高的时期在硬核期；Mg在花期、硬核期和成熟期含量均较高，3个时期含量相差不大；B含量高的时期是在硬核期和脂肪转化期。

表 6 不同矿质元素各发育期需求比例

Table 6 Demand ratio of different mineral elements in each development period

发育期 Developmental stage	氮N	磷P	钾K	钙Ca	镁Mg	铁Fe	锰Mn	铜Cu	锌Zn	硼B
花期 Flowering stage	2.23	3.16	1.82	1.15	1.40	4.23	2.72	2.11	3.60	1.07
幼果膨大期 Young fruit expanding stage	1.28	1.56	1.10	1.03	1.05	1.10	1.07	1.17	1.38	1.00
硬核期 Shell-hardening stage	1.30	1.13	1.17	1.57	1.41	1.98	1.20	1.45	1.20	1.42
脂肪转化期 Fat transforming stage	1.00	1.08	1.00	1.00	1.00	1.08	1.00	1.00	1.00	1.46
果实成熟期 Fruit ripening stage	1.16	1.00	1.62	1.13	1.35	1.00	1.01	1.01	1.00	1.37

3 讨 论

3.1 不同树龄核桃树对矿质元素的需求

不同树龄核桃树对不同矿质元素的需求量不同。无论幼树还是成年树，核桃对Ca的需求量最大，P最小，说明核桃是喜钙的植物。核桃1~3年生幼树枝条发育迅速，枝条的生长需要消耗大量的N元素，因此此时对N的需求量高于K；4~8年生核桃

树处于初结果期和盛果初期,此时结果量逐渐增加,核桃青皮发育需要大量的K,核桃青皮中K元素的含量达到了111.90 g·kg^{-1},占到总含量的75.9%,这与河北农业大学史永江等[12]对辽宁1号和清香核桃的测定结果一致,陈向明等[19]研究表明山核桃外果皮的无机成分中含有较高的钾元素,何国庆等[20]的研究也表明山核桃果实成熟过程中,钾大量从种仁向果皮转移,果皮中的钾高于种仁中,这个阶段树体对K元素的需求量超过了N元素;9~12年生的核桃树结果量趋于稳定,而树体枝干、根系的生长发育还在继续,枝干、根系的生长发育需N量远大于需K量,因此这个阶段树体对N元素的需求量又超过了K。

不同树龄核桃树微量元素的需求均以Fe元素最高,树体中Fe的含量远远高于其他4种微量元素,说明Fe对核桃的生长发育比较重要,各个年龄段的核桃树均要及时补充Fe元素,防止缺素症的发生。

3.2　不同发育关键期对不同矿质元素的需求

核桃的5个发育关键期对不同矿质元素的需求量有一定的差异。花期、膨大期大量元素含量的排序为K > N > Ca > P > Mg,硬核期、脂肪转化期和果实成熟期大量元素的排序为K > N > Ca > Mg > P,说明不同发育关键期对K、N、Ca的需求趋势相同。N、P、K含量最高的时期是在花期,花期是花序和枝条生长旺盛的时期,需要N、P、K三大元素较多,花期的营养是利用的前一年的储存营养,因此秋季基肥的种类要有充足的N、P、K肥,以满足花期的营养供应。Ca含量最高的时期是在硬核期,硬核期是果实果壳发育的重要时期,果壳的发育要求大量Ca元素的参与。Mg在花期、硬核期和果实成熟期的含量相差无几。在测定的5个微量元素中Fe在整个发育期的含量最高,远远高于其他4个,说明核桃是喜Fe的植物,花期和硬核期需Fe量较大。

3.3　不同树龄核桃树矿质营养元素的年积累量

以1~12年生核桃树10种矿质元素积累量的曲线方程可以求得不同树龄各种矿质元素的积累量,从而求得某一年矿质元素的增加量,即为当年该矿质元素的需求量。以6年和7年生的Ca元素为例,按Ca元素积累曲线方程为y(Ca)=−0.014 9x^6+0.508 8x^5− 6.303 0x^4 + 35.084 0x^3− 78.387 0x^2 + 129.280 0x−54.998 0,求得6年生和7年生核桃树Ca元素积累量分别为569.46 g和707.74 g,与实际测得的数值575.70 g和715.35 g,误差率仅为1.08%和1.06%,说明此方程有效。7年生核桃相对于6年生核桃树Ca元素增加量为138.28 g,因此7年生核桃树当年Ca元素的增加量为138.28 g。同理求得7年生核桃树当年N、P、K、Mg元素的增加量为115.88、14.59、119.14和18.78 g,Fe、Mn、Cu、Zn、B的增加量为1521.19、314.75、217.03、238.19、422.21 mg。由此可知,盛果初期的核桃树,矿质元素的年需求量排序为大量元素Ca、K、N、Mg、P,微量元素为Fe、B、Mn、Zn、Cu。根据方程求得的矿质元素年增加量为核桃年各器官营养元素的含量,这一数据可以为核桃精准施肥提供依据。

3.4　核桃年发育关键期需肥量

根据核桃矿质元素的年积累量和果实发育关键期需肥规律,可以明确核桃发育关键期各矿质元素的实际含量。以7年生核桃为例,N元素在花期、幼果膨大期、硬核期、脂肪转化期和果实成熟期5个时期的积累量分别为37.07、21.28、21.61、16.63和19.29 g;P元素在5个发育关键期的积累量分别为5.81、2.87、2.08、1.99和1.84 g;K元素在5个发育期的积累量分别为32.32、19.53、20.77、17.76和28.76 g;Ca元素在5个时期的积累量分别为27.04、24.22、36.92、23.52和26.57 g;Mg元素在5个时期的积累量为4.23、3.18、4.26、3.02和4.08 g;Fe元素在5个时期的含量为685.26、178.20、320.76、174.96和162.00 mg;B元素在5个时期的积累量为71.48、66.81、94.86、97.54和91.52 mg。

研究得到的数据为核桃各器官实际测得的矿质元素含量,实际施肥量需要根据肥料有效成分含量、肥料利用率以及肥料损耗等因素来计算。另外检测样本选择的是具有代表性的生长管理水平中等的树体,具体到每一株树可以根据具体的长势对所得的数据进行适量调整。

4　结　论

核桃的生物量构成不同年龄段差别较大,1~3年生幼树复叶和1年生枝占比较大,从4年生开始,多年生枝和主干占比较大。随树龄增加树体生物量增加符合多项式方程y=−0.001 4x^6+0.050 0x^5−0.652 4x^4+3.867 9x^3−9.281 2x^2+14.302 0x−6.780 8(R^2=0.999 7)。

核桃不同发育关键期对营养元素的需求规律不同,N、P、K的需肥高峰期在花期,Ca的需肥高峰在

硬核期。N、P、K 3大营养元素在花期、幼果膨大期、硬核期、脂肪转化期、果实成熟期5个发育关键期的需求比例分别为2.23∶1.28∶1.30∶1.00∶1.16、3.16∶1.56∶1.13∶1.08∶1.00、1.82∶1.10∶1.17∶1.00∶1.62。

参考文献 References：

[1] 杨波，车玉红，郭春苗，徐叶挺，龚鹏，艾沙江•买买提，刘江，陈春生 . 扁桃树体生物量构成及常量矿质元素累积特性研究[J]. 新疆农业科学，2015，52(8)：1442-1446.
YANG Bo，CHE Yuhong，GUO Chunmiao，XU Yeting，GONG Peng，Aishajiang · Maimaiti，LIU Jiang，CHEN Chunsheng. Compositional analysis of biomass and aecumulative properties of major mineral elements in almond[J]. Xinjiang Agricultural Sciences，2015，52(8)：1442-1446.

[2] 樊红柱，同延安，吕世华，刘汝亮 . 苹果树体氮含量与氮累积量的年周期变化[J]. 中国土壤与肥料，2008(4)：15-17.
FAN Hongzhu，TONG Yan'an，LÜ Shihua，LIU Ruliang. Annual change of nitrogen content and accumulation in apple tree[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2008(4)：15-17.

[3] 樊红柱，同延安，赵营，刘汝亮 . 苹果树体磷素动态规律与施肥管理[J]. 干旱地区农业研究，2007，25(1)：73-75.
FAN Hongzhu，TONG Yan'an，ZHAO Ying，LIU Ruliang. Phosphorus dynamics and fertilization management of apple tree[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2007，25(1)：73-75.

[4] 樊红柱，同延安，吕世华，刘汝亮 . 苹果树体钾含量与钾累积量的年周期变化[J]. 西北农林科技大学学报，2007，35(5)：169-172.
FAN Hongzhu，TONG Yan'an，LÜ Shihua，LIU Ruliang. Annual change of potassium content and accumulation in apple tree[J]. Journal of Northwest A & F University，2007，35(5)：169-172.

[5] 苏艳丽，杨健，李秀根，王龙，王苏珂，薛华柏 . 3个早熟梨品种矿质元素含量变化及其相关性[J]. 经济林研究，2017，35(3)：229-233.
SU Yanli，YANG Jian，LI Xiugen，WANG Long，WANG Suke，XUE Huabai. Changes of mineral element contents of three cultivars of early ripening pear and their correlation analysis[J]. Non-wood Forest Research，2017，35(3)：229-233.

[6] 姜喜，郑传亮，陈加利，马玲，蒋丽丽，张琦 . 梨果实生长期矿质元素变化研究[J]. 中国农学通报，2011，27(31)：179-183.
JIANG Xi，ZHENG Chuanliang，CHEN Jiali，MA Ling，JIANG Lili，ZHANG Qi. Studies on mineral nutrition content in pears during the development[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2011，27(31)：179-183.

[7] 张志华，高仪，王文江，张毅功，方正 . 核桃果实成熟期间主要营养成分的变化[J]. 园艺学报，2001，28(6)：509-511.
ZHANG Zhihua，GAO Yi，WANG Wenjiang，ZHANG Yigong，FANG Zheng. Changes of main nutrient during the fruit ripening ofwalnut[J]. Acta Horticulturae Sinica，2001，28(6)：509-511.

[8] 盖素芬，赵宝军，郑庆田，李冬生 . 早实核桃不同生育期主要器官氮、磷、钾含量变化规律及特征[J]. 经济林研究，2002，20(2)：63-66.
GAI Sufen，ZHAO Baojun，ZHENG Qingtian，LI Dongsheng. Characteristics and pattern of change in nitrogen，Phosphorus andpotassium content in various organs of a precocious walnut cultivar atits different growth stages[J]. Non-wood Forest Research，2002，20(2)：63-66.

[9] 赵明范 . 核桃叶片N、P、K元素营养诊断指标的研究[J]. 林业科学，1991，27(6)：652-657.
ZHAO Mingfan. Study on indices of nutrient diagnosis of N，P，K elements in leaves of walnut[J]. Scientia Silvae Sinicae，1991，27(6)：652-657.

[10] 夏国华，黄坚钦，解红恩，王正加，汪樟春，刘力 . 山核桃不同器官矿质元素含量的动态变化[J]. 果树学报，2014，31(5)：854-862.
XIA Guohua，HUANG Jianqin，XIE Hongen，WANG Zhengjia，WANG Zhangchun，LIU Li. Dynamic changes of mineral elements in different organs of hickory[J]. Journal of Fruit Science，2014，31(5)：854-862.

[11] 冀爱青，朱超，彭功波，李建中，杨红雁，吴国良 . 不同早实核桃品种叶片矿质元素含量变化及其与产量的关系[J]. 植物营养与肥料学报，2013，19(5)：1234-1240.
JI Aiqing，ZHU Chao，PENG Gongbo，LI Jianzhong，YANG Hongyan，WU Guoliang. Relationship between yield and mineral element contents in leaves of four early walnut cultivars[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2013，19(5)：1234-1240.

[12] 史永江，杨少辉，张志华，郭丽娟 . 核桃果实发育过程中青皮和果仁中矿质元素含量的变化[J]. 河北林果研究，2007，22(2)：177-179.
SHI Yongjiang，YANG Shaohui，ZHANG Zhihua，GUO Lijuan. Changes of mineral elements content in pericarp and kernel of walnut fruit development[J]. Forestry and Ecological Sciences，2007，22(2)：177-179.

[13] 郭向华，李保国，张雪梅 . 早实薄皮核桃叶片矿质元素年变化规律研究[J]. 河北林果研究，2011，26(2)：153-156.
GUO Xianghua，LI Baoguo，ZHANG Xuemei. Annual changes rule of leaf mineral element contents in early bearing and pellicle walnuts[J]. Forestry and Ecological Sciences，2011，26(2)：153-156.

[14] 赵明范 . 核桃树体N、P、K营养元素诊断中采叶时间的确定[J]. 林业科学研究，1991，4(5)：578-581.
ZHAO Mingfan. Determination of leaf sampling time in diagnosis of N，P，K nutrient elements in walnut tree[J]. Forest Research，1991，4(5)：578-581.

[15] 张建英，毛向红，张莹莹 . 核桃果实发育关键期矿质元素需求规律研究[J]. 黑龙江农业科学，2019(3)：49-53.
ZHANG Jianying，MAO Xianghong，ZHANG Yingying. Research on the law of mineral elements requirement in critical period of walnut fruit development[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences，2019(3)：49-53.

[16] 梁智，邹耀湘，张计峰 . 新疆南疆核桃树氮磷钾肥料效应试验研究[J]. 新疆农业科学，2010，47(5)：958-963.
LIANG Zhi，ZOU Yaoxiang，ZHANG Jifeng. The effect of nitrogenous，phosphatic，and potassium fertilizers on walnut in Southern of Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences，2010，47(5)：958-963.

[17] 梁智，张计峰 . 果树腐植酸根际肥料在核桃树上的施用试验[J]. 农业科技通讯，2009(11)：91-92.
LIANG Zhi，ZHANG Jifeng. Effect of humic acid rhizosphere fertilizer on fruit tree[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology，2009(11)：91-92.

[18] 梁智，张计峰 . 两种枣树矿质营养元素累积特性研究[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(3)：688-692.
LIANG Zhi，ZHANG Jifeng. Accumulation properties of mineral elements in two types of Chinese jujube[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2011，17(3)：688-692.

[19] 陈向明，李军，唐龙华，汪四美 . 山核桃外果皮制备焦磷酸钾工艺条件的筛选[J]. 经济林研究，2008，26(3)：47-52.
CHEN Xiangming，LI Jun，TANG Longhua，WANG Simei. Optimal technical conditions of preparing potassium pyrophosphate from *C. cathayensis* Exocarp[J]. Non-wood Forest Research，2008，26(3)：47-52.

[20] 何国庆，俞春莲，饶盈，章富阳，沈晓飞，黄坚钦，刘力，夏国华 . 山核桃果实成熟过程中矿质元素及脂肪酸组分变化[J]. 浙江农林大学学报，2019，36(6)：1208-1216.
HE Guoqing，YU Chunlian，RAO Ying，ZHANG Fuyang，SHEN Xiaofei，HUANG Jianqin，LIU Li，XIA Guohua. Dynamic changes in composition of mineral elements and fatty acids forhickory nuts(*Carya cathayensis*)during maturity[J]. Journal of Zhejiang A&F University，2019，36(6)：1208-1216.