辽西北沙地苹果—花生间作系统土壤养分空间分布特征及间作效应

程昊天[1]，孔 涛[1]，姜 涛[2]，王振宇[3]，郑 爽[1]，高 欣[1]，王 立[1]

（1.辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院，辽宁 阜新 123000；
2.辽宁省沙地治理与利用研究所，辽宁 阜新 123000；3.辽宁科技学院 生物医药与化学工程学院，辽宁 本溪 117004）

摘 要：[目的] 研究辽西北沙地农林复合系统土壤养分的空间分布及其效应，从土壤养分角度探讨果农间作系统中果树和农作物对土壤养分的相互作用关系，为该区农林复合系统的可持续经营提供科学合理的依据。[方法] 以苹果与花生间作、花生单作、苹果单作为研究对象，对 0—60 cm 土层深度，0—300 cm 水平距离范围内土壤养分含量进行测定和分析。[结果] 沙地间作系统中土壤有机质、速效钾极缺乏，全氮、碱解氮很缺乏，全磷缺乏，有效磷含量中等；间作系统在水平方向上，苹果树和花生植株对总养分有机质、氮、磷的竞争激烈位点位于果树带区，对有效养分氮、磷、钾的竞争激烈位点位于近果树作物区；在垂直方向上，各养分总体表现出了表聚性，间作系统对有机质、有效磷的竞争主要位于深土层，对全磷、速效钾的竞争主要位于表土层，对全氮、碱解氮表现为合作效应，表土层效应更高；与苹果单作、花生单作相比较，间作系统速效钾和有效磷含量呈现负效应。[结论] 沙地苹果—花生间作系统土壤养分贫瘠，应在果树带区施用有机肥、磷肥，作物区施入钾肥，以减轻养分竞争，提高养分效应。

关键词：土壤养分；果农间作；空间分布；间作效应；沙地

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2020)06-0043-08 **中图分类号**：S158.2

文献参数：程昊天，孔涛，姜涛，等.辽西北沙地苹果—花生间作系统土壤养分空间分布特征及间作效应[J].水土保持通报，2020，40(6)：43-50. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.007；Cheng Haotian，Kong Tao，Jiang Tao，et al. Spatial distribution characteristics of soil nutrients and intercropping effect in sandy land apple-peanut intercropping system in Northwest Liaoning Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(6)：43-50.

Spatial Distribution Characteristics of Soil Nutrients and Intercropping Effect in Sandy Land Apple-peanut Intercropping System in Northwest Liaoning Province

Cheng Haotian[1]，Kong Tao[1]，Jiang Tao[2]，Wang Zhenyu[3]，Zheng Shuang[1]，Gao Xin[1]，Wang Li[1]

（1. *College of Environmental Science and Engineering，Liaoning Technical University，Fuxin，Liaoning* 123000，*China*；2. *Liaoning Institute of Sandy Land Control and Utilization，Fuxin，Liaoning* 123000，*China*；
3. *School of Biomedical and Chemical Engineering，Liaoning Institute of Science and Technology，Benxi，Liaoning* 117004，*China*）

Abstract：[Objective] The spatial distribution and effects of soil nutrients in the agro-forestry system in sandy land were explored in order to provide scientific basis for the sustainable management of the agroforestry system from a perspective of soil nutrients in the region of Northwest Liaoning. [Methods] Soils in apple-peanut intercropping，peanut monoculture，and apple monoculture were sampled to determine and analyze soil nutrients contents in the range of 0—60 cm and 0—300 cm horizontal distance. [Results] Total organic matter and available potassium were extremely deficient，the total nitrogen and available nitrogen were very deficient，total phosphorus was deficient，and the available phosphorus content was medium in the intercropping system of sandy land. In the horizontal direction of the intercropping system，the intense competition sites

收稿日期：2020-07-13 **修回日期**：2020-08-10

资助项目：国家自然科学基金项目“双氰胺对北方棕壤土壤微生物代谢 α-酮戊二酸的影响”(41701300)；辽宁省高等学校基本科研项目(LJ2017QL015)

第一作者：程昊天(1992—)，男(汉族)，辽宁省阜新市人，硕士研究生，研究方向为生态修复理论。Email：749000743@qq.com。

通讯作者：孔涛(1981—)，男(汉族)，陕西省渭南市人，博士，副教授，硕士生导师，主要从事生态修复理论等方面的研究。Email：kongtao2005@126.com。

for total organic matter, total N and total P for apple trees and peanut plants were located in the fruit tree zone, and the intense competition sites for available nutrients of N, P and K were located in the near fruit trees. In the vertical direction, all nutrients showed surface aggregation. The competition of organic matter and available phosphorus in the intercropping system was mainly located in the deep soil layer, and the competition of total phosphorus and available potassium was mainly located in the top soil layer. There was a cooperative effect on total nitrogen and available nitrogen, and the effect in soil of surface layer was more obvious. Compared to peanut monoculture and apple monoculture, the contents of available potassium and available phosphorus in the intercropping system showed a negative effect. [Conclusion] Soil nutrients in the apple-peanut intercropping system were poor. Organic fertilizers and phosphate fertilizers are recommended to be applied in the fruit tree zone, and potassium fertilizer should be applied in the crop area so as to reduce nutrient competition and improve nutrient effect.

Keywords: soil nutrients; fruit-crop intercropping system; spatial distribution; intercropping effect; sandy land

农林复合系统在防治水土流失和提高系统生产力等方面发挥着重要的作用[1],然而这种作用可能被树木和作物的竞争所抵消[2]。如何充分利用树木和作物的协同作用,最大程度地利用现有资源是提高农林复合系统整体生产力的关键[3]。果农间作是农林复合系统的主要模式之一,因其具有较高的生态和经济效益,近年来得到广泛的应用[4-5]。与此同时,受土壤水分、养分和光照强度等有限性资源的影响,果农间作模式势必会引发果树和农作物对资源的竞争,进而影响作物产量及降低经济效益[6-7]。目前,主要从地上界面和地下界面两个角度对果农间作系统的竞争关系进行研究,学者们深入研究后发现,林木与作物通过根系在地下界面对土壤水分和养分的竞争较林木与作物在地上界面对光、热和气的竞争更为激烈[8-11]。因此,对果农间作系统土壤养分分布特征进行研究,从而认清其对土壤养分资源的竞争与互补关系,是果农间作系统能否实现高效可持续经营的关键问题[12]。辽西风沙半干旱区地域辽阔,拥有丰富的土地和光热资源,是辽宁省重要的商品粮和经济作物生产基地,然而由于本区干旱少雨,水土流失和风蚀严重,区域农业生产和经济发展被严重限制[13]。因此,通过合理布置农林复合系统,在有效改善生态环境的同时提高经济效益,对辽西地区的振兴发展意义重大。本文以辽西北沙地苹果—花生间作系统为研究对象,通过对不同水平和垂直范围内土壤养分空间分布特征的研究,分析间作系统的土壤养分效应,旨在从土壤养分角度探讨果农间作系统中果树和农作物的相互作用关系,为该区域农林复合系统的可持续经营提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在辽宁省固沙造林研究所章古台试验基地进行。基地位于辽宁省阜新市彰武县(42°39′—42°43′N,122°23′—122°33′E),地处科尔沁沙地东南部边缘,平均海拔 226.5 m,属亚湿润大陆性季风气候。年均气温 7.9 ℃,极端最低气温 -36.3 ℃,极端最高气温 38.3 ℃;年平均降水量 498.8 mm,其中 60%～70% 的降水集中在 6—8 月,年平均蒸发量 11 762 mm;无霜期平均 154 d,年平均风速 3.8 m/s。土壤主要为风沙土,流动风沙土的物理性沙粒占 94.7%,物理性黏粒占 5.3%。植被以抗旱性较强的沙生植物为主,代表性植物有色木槭(*Acer pictum*)、山里红(*Crataegus pinnatifida*)、榆树(*Ulmus pumila*)、大果榆(*Ulmus macrocarpa*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、盐蒿(*Artemisia halodendron*)、花曲柳(*Fraxinus rhynchophylla*)、中华隐子草(*Cleistogenes chinensis*)等。主要造林树种为樟子松(*Pinus sylvestris*)、杨树(*Populus*)和苹果(*Malus pumila*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设计与样品采集 本研究以当地主要经济树种寒富苹果与农作物花生作为研究对象,试验包含 3 个处理:苹果—花生间作系统、花生单作系统及苹果单作系统。每个处理设置 3 个重复,每块样地作为 1 次重复,共设置 9 块样地。样地自北向南整齐排列成 3 行,其中第 1 行为花生单作处理,第 2 行为苹果—花生间作处理,第 3 行为苹果单作处理,各处理行均设置了 1 行苹果树保护行。每个处理行均包含 3 块间距 5 m 的样地,每块样地面积为 7.5 m×6.0 m,处理行间距均为 6 m。苹果—花生间作、苹果单作的每个样地均包括 3 棵果树,苹果与花生行向均为南北走向,苹果行距 6 m,株距 2.5 m,花生间距设为 0.25 m,间作系统中花生距苹果树基部为 1 m。果树距样地东西边界各 3 m,距南北边界各 1.25 m,即样地边界两行果树中线处。苹果栽植于 2014 年,栽植密度为 770 株/hm^2,待苹果生长 2 a 发育较稳定后,于 2016

年 4 月开始,每年持续进行花生单作、间作种植,并划分样地区域,测定各样地在处理前的土壤养分含量(表 1),处理前各样地的土壤养分含量基本一致,保障了本研究中处理后土壤养分数据的可比性。

在花生种植前进行翻耕整地,翻耕深度为20 cm,以经过腐熟处理的牛粪作为基肥均匀施肥,施加量为 7 500 kg/hm^2。牛粪的基础肥力如下:有机质 14.5%,全氮 0.32%,全磷 0.25%,全钾 0.16%。基肥一次性施足,不再追肥。

试验期间样地每 15 d 灌溉一次,每次灌溉量为 1 000 m^3/hm^2。整个种植过程采用科学精细化管理,以保证试验区间作与单作的耕作及水肥管理水平一致。

本次研究的单作、间作系统花生种植时间为 2019 年 4 月 20 日,研究样地苹果树株高为 3.5 m。胸径 8.5 cm,南北冠幅 1.1 m,东西冠幅 1.0 m。于 2019 年 8 月 20 日采集土壤样品以测定土壤养分。苹果—花生间作系统中采样位置距苹果树基部依次为 0,25,50,75,100,150,200,300 cm,土层深度依次为:0—10,10—20,20—30,30—40,40—50,50—60 cm;在花生、苹果单作样地内按 S 形布设 5 个样点采集土壤样品。将上述土壤样品带回实验室,风干过筛后测定土壤养分含量。

表 1　各样地处理前土壤养分含量(2016 年)

取样区域	有机质/(g·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	碱解氮/(mg·kg^{-1})	有效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})
间作区	4.49	0.73	0.53	33.80	15.56	12.22
花生单作区	4.89	0.74	0.56	34.28	16.08	12.83
苹果单作区	4.57	0.68	0.56	33.87	15.76	12.08

1.2.2　测定指标及方法　土壤养分指标(土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾)于 2019 年 9—12 月在实验室进行测定。土壤有机质用油浴加热消煮—重铬酸钾法测定,全氮采用蒸馏法测定,全磷采用酸溶钼锑抗混合比色法测定,碱解氮采用碱解扩散法测定,有效磷采用碳酸氢钠溶液浸提—硫酸钼锑抗比色法测定,速效钾采用火焰光度计法测定。测定方法根据鲍士旦编著的《土壤农化分析》的方法进行[14]。

1.3　数据分析

试验数据采用 Excel 2017 进行数据处理和绘制表格、曲线图和柱状图,利用 SPSS 22.0 软件进行平均值、标准差、变异系数、偏度、峰度和 K-S 值的计算和正态分布的分析,并对单作和间作的土壤养分进行单因素方差分析(one-way ANOVA)。

2　结果与分析

2.1　间作系统土壤养分指标的描述性统计特征

对苹果—花生间作系统 6 种土壤养分指标进行经典统计分析和 K-S 检验,计算各指标变异系数,划分土壤养分指标的变异程度(详见表 2),并根据全国第二次土壤普查养分分级标准对各土壤养分指标进行分级,分析土壤养分状况。

表 2　苹果—花生间作系统 0—60 cm 土层土壤养分指标统计特征值

土壤养分指标	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%	偏度	峰度	K-S 值	分布类型	样本数
有机质/(g·kg^{-1})	6.10	2.45	4.09	1.17	32.13	0.90	−0.61	0.24	lgN	144
全氮/(g·kg^{-1})	1.34	0.30	0.73	0.21	31.73	0.97	1.33	0.21	lgN	144
全磷/(g·kg^{-1})	0.65	0.20	0.49	0.10	22.11	−0.76	0.54	0.16	lgN	144
碱解氮/(mg·kg^{-1})	94.97	4.57	37.23	28.25	94.17	1.05	−0.43	0.25	lgN	144
有效磷/(mg·kg^{-1})	17.74	6.52	11.53	3.02	25.84	0.41	−0.81	0.11	N	144
速效钾/(mg·kg^{-1})	15.99	1.25	7.98	3.38	44.96	0.33	−0.58	0.12	N	144

注:表中 N 为正态分布,lgN 为对数正态分布。

由表 2 可知,苹果—花生间作系统 0—60 cm 土层范围内,土壤有机质、速效钾变化范围分别为 2.45～6.10 g/kg,1.25～15.99 mg/kg,平均值分别为 4.09 g/kg 和 7.98 mg/kg,整体上处于极缺乏状态;土壤全氮、碱解氮变化范围分别为 0.30～1.34 g/kg,4.57～94.97 mg/kg,平均值分别为 0.73 g/kg,37.23 mg/kg,整体上处于很缺乏状态;土壤全磷最小值为0.20 g/kg,最大值为 0.65 g/kg,平均值为 0.49 g/kg,整体上处于缺乏状态;土壤有效磷最小值为 6.52 mg/kg,最大值为 17.74 mg/kg,平均值为 11.53 mg/kg,整体上处于中等状态。综上所述,苹果与花生复合系统土壤养分状况是土壤有效磷含量中等、全磷含量缺乏、有机质不足、缺氮、缺钾。不同土壤养分指标变异强度不同,其变异程度大小依次为:碱解氮>速效钾>有机质>全氮>有效磷>全磷,土壤养分指标变异系数为 22.11%～94.97%,均小于 100 %,属于中等变异性,上

述分析说明苹果与花生复合系统土壤养分指标在空间分布上总体存在中等变异性。结合 K-S 检验值可知，土壤有效磷、速效钾呈正态分布，土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮经自然对数转换后符合正态分布。

2.2 间作系统土壤养分含量空间分布

2.2.1 土壤养分含量分布特征 由图 1 可知，随距果树水平距离的增加，表土层(0—20 cm)有机质、全氮、全磷、有效磷呈现“先降—后增—再降”的变化趋势；土壤碱解氮含量先升后降；速效钾含量先降后升。在>20—40 cm 的土层中，有机质、全氮、有效磷、速效钾含量随水平距离增加先降后升，全磷、碱解氮呈先升后降的趋势。全氮、速效钾的极值出现在同一位置，其中，二者最小值均出现在 150 cm 处，峰值均出现在 0 cm 处；有效磷最小值和最大值分别出现在 200，300 cm 处。>40—60 cm 土层的有机质、全氮、全磷含量随水平距离增加呈现“先升后降”的变化趋势，3 者的最小值均出现在 0 cm 处；碱解氮、有效磷、速效钾随水平距离增加“先降后升”。

从土层的角度分析，土壤有机质、全氮、碱解氮、速效钾含量随着土层深度的增大持续下降。土壤全磷含量在水平距离 0，150，300 cm 处随土层加深而不断降低；而在水平距离 25，50，75，100 cm 处呈现出 20—40 cm >40—60 cm >0—20 cm 的规律。土壤有效磷含量在靠近果树的 75 cm 水平范围内，随着土层的加深而降低，而在>200—300 cm 水平范围内变化规律不明显。

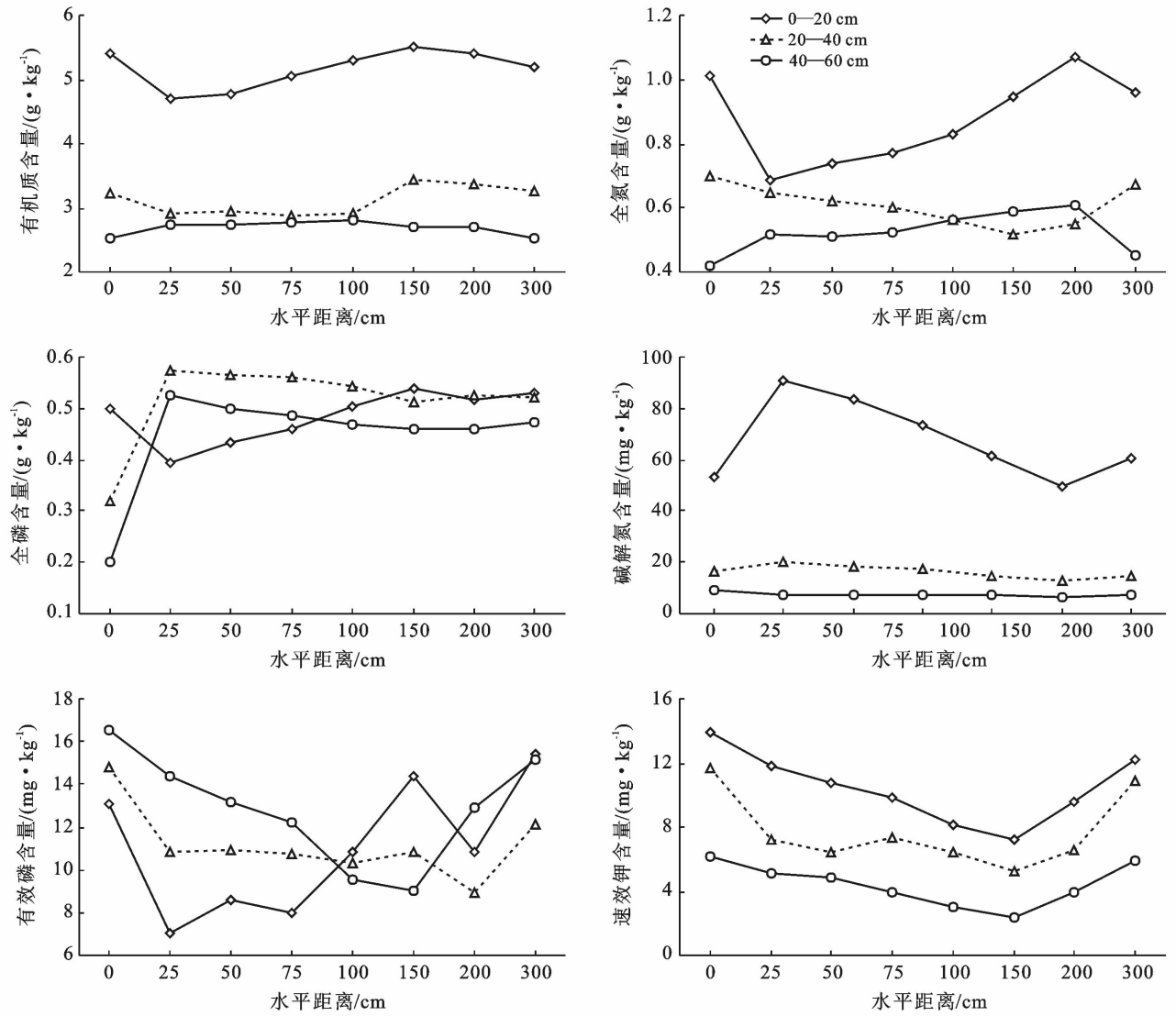


图 1 研究区土壤养分空间分布特征

为了更加直观分析间作系统土壤养分含量的空间分布特征，结合果树的施肥管理方式和果树与作物的实际间距，本研究将[0，100 cm)范围定义为果树带区，[100 cm，300 cm]范围定义为作物区。其中，[100 cm，200 cm)为近果树作物区，[200 cm，300 cm]为远果树作物区。并定义：

某种土壤养分变化系数=(SN_i－SN_{ck})/SN_{ck}　(1)

式中:SN_i 为间作系统某种土壤养分含量; SN_{ck}为单作系统某种土壤养分含量。

由表 3 可知,从水平区带的角度分析,有机质、全磷的土壤养分变化系数均为负值,在果树带[0,100 cm)相比单作下降幅度最大;全氮土壤养分变化系数在表土层(0—20 cm)为负值,而在深土层(>20—60 cm)为正值,果树带区表土层的全氮含量下降幅度最大,深土层的提高幅度最小。这表明间作系统在果树带区对土壤总养分竞争激烈,果树对总养分的竞争大于花生。碱解氮、有效磷、速效钾的土壤养分变化系数在各区域有正有负,其在近果树作物区[100 cm,200 cm)相比单作降幅最大或提高最小,表明间作系统在近果树作物区对土壤速效养分竞争激烈,花生对养分的竞争大于果树。

从土层角度分析,有机质、有效磷的变化系数在深土层均值分别为－0.17 和－0.11,明显低于表土层的均值－0.06 和－0.05,表明间作系统对有机质、有效磷的竞争主要集中于深土层。

全磷、速效钾规律则恰好相反,表土层相对于单作的降幅明显高于深土层,说明其竞争主要集中于表土层。全氮在表土层的变化系数均值为－0.04,在深土层为 0.12,表明表土层呈现竞争作用而深土层呈现合作效果。碱解氮在表土层和深土层的变化系数均值分别为 1.45 和0.18,均呈现合作效应,表土层高于深土层。

表 3　苹果—花生间作系统不同土层土壤养分变化系数

土层深度/cm	取样区	土壤养分变化系数					
		有机质	全氮	全磷	碱解氮	有效磷	速效钾
0—20	[0,100 cm)	－0.10	－0.17	－0.27	0.70	－0.04	0.03
	[100 cm,200 cm)	－0.08	－0.12	－0.20	0.04	－0.07	－0.44
	[200 cm,300 cm)	－0.07	－0.05	－0.19	0.07	－0.03	－0.21
20—60	[0,100 cm)	－0.21	0.14	－0.14	0.84	0.13	0.04
	[100 cm,200 cm)	－0.20	0.15	－0.11	－0.21	－0.29	－0.46
	[200 cm,300 cm)	－0.19	0.24	－0.10	－0.10	－0.18	－0.13

注:计算时,[0,1.0 m)果树带区的 SN_{ck}为果树单作,[1.0 m,3.0 m]作物区的 SN_{ck}为花生单作。

2.2.2　土壤养分含量竞争激烈位点　通过土层深度加深后土壤养分含量最小值出现位点与苹果树的距离,可推断出土壤养分竞争激烈位点的位置变化规律。表土层(0—20 cm)土壤有机质、全氮、全磷、有效磷最小值均出现在水平距离 25 cm 处,碱解氮和速效钾则出现在 150 cm处。>20—40 cm 土层,有机质在>25—100 cm 范围内最小;全磷含量最小值出现在 0 cm 处;全氮、碱解氮、有效磷、速效钾则出现在 150 cm 或 200 cm 处。对>40—60 cm 土层,土壤有机质、全氮、全磷最小值均出现在水平距离 0 cm 处;有效磷和速效钾最小值则出现在水平距离 150 cm 处;碱解氮含量在 0—300 cm 水平范围内趋于稳定。由此可知,间作系统对总养分碳、氮、磷的竞争激烈位点总体位于果树带区,而对有效养分碳、氮、磷的竞争激烈位点主要位于作物区。综上所述,随着土层的加深,土壤有机质、全氮、全磷的土壤养分竞争激烈位点向靠近苹果树的位置移动,有效磷的土壤养分竞争激烈位点向远离苹果树的位置移动,速效钾、碱解氮的土壤养分竞争激烈位点位置保持不变。

2.3　间作与单作系统土壤养分对比分析

由表 4 可知,间作系统的有机质、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾平均含量与花生单作差异显著($p<0.05$),其中,有机质、全磷、有效磷和速效钾的平均含量显著低于花生单作($p<0.05$),碱解氮平均含量显著高于花生单作($p<0.05$),全氮平均含量与花生单作无显著差异($p>0.05$);与苹果单作相比,间作系统的有机质、全磷平均含量显著低于苹果单作($p<0.05$),碱解氮平均含量显著高于苹果单作($p<0.05$),全氮、有效磷、速效钾平均含量与苹果单作相比差异不显著($p>0.05$)。就两种单作而言,花生单作的各养分平均含量均显著高于苹果单作($p<0.05$)。

表 4　苹果—花生间作、花生单作、苹果单作土壤养分对比分析

养分含量	有机质/(g·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	碱解氮/(mg·kg^{-1})	有效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})
苹果花生间作	4.09±1.17^{c}	0.73±0.21^{ab}	0.49±0.10^{c}	37.23±28.25^{a}	11.53±3.02^{b}	7.98±3.38^{b}
花生单作	4.74±1.39^{a}	0.75±0.17^{a}	0.60±0.14^{a}	33.28±7.81^{b}	13.75±2.78^{a}	10.84±2.08^{a}
苹果单作	4.55±1.22^{b}	0.72±0.09^{b}	0.57±0.13^{b}	25.73±3.83^{c}	10.52±1.94^{b}	8.76±1.59^{b}

注:表中同一土层深度同列数据后无相同小写字母的表示差异显著($p<0.05$)。

为深入分析各间作类型中作物土壤养分整体空间的分布规律,定义:

间作系统土壤养分效应=

$$(SA_i - SA_{ck})/SA_{ck} \times 100\% \quad (2)$$

式中:SA_i 为间作系统某种土壤养分平均含量; SA_{ck} 为单作系统某种土壤养分平均含量。

由图 2 可知,苹果—花生间作系统与花生单作相比,土壤有机质、全氮、全磷、有效磷、速效钾的土壤养分效应均为负值,表现为负效应,表明间作系统土壤有机质、全氮、全磷、有效磷、速效钾含量低于花生单作。间作系统中苹果和花生对上述养分进行竞争和利用,且竞争程度不同,表现为:速效钾(-26.42%)>全磷(-18.25%)>有效磷(-16.11%)>有机质(-13.77%)>全氮(-2.91%),其中土壤速效钾养分效应最小;土壤碱解氮的土壤养分效应为正值,表现为正效应,即与花生单作相比,间作系统土壤中的碱解氮含量较高。对比苹果单作,间作系统土壤有机质、全磷、速效钾的土壤养分效应为负效应,表现为:全磷(-14.27%)>有机质(-10.17%)>速效钾(-8.87%),全磷的土壤养分效应最小。土壤全氮、碱解氮、有效磷的土壤养分效应为正效应。上述分析表明,苹果—花生间作系统对土壤中的速效钾、全磷、有机质的需求量较大,结合全国第二次土壤普查养分分级标准,在苹果—花生间作系统后期施肥管理中应追加钾肥、磷肥和有机肥。

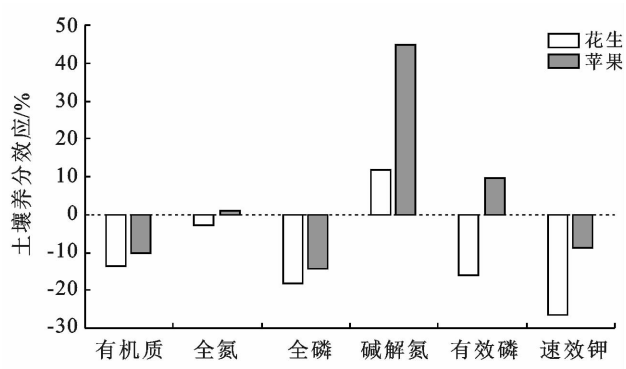


图 2 苹果—花生间作系统土壤养分水平变化系数

3 讨 论

本研究随着土层加深,间作系统各养分含量总体呈下降的趋势,有明显的表聚性。这是由于苹果和花生地上部分的凋落物和地下部分的死亡根系在微生物的作用下,在表土层形成腐殖质层,腐殖质经过进一步的分解,为林下农作物的生长提供养分[15-16],从而对表土层的土壤养分累积起到增益作用。同时,间作养分竞争产生的介质是土壤及其溶液,是通过植物根系的竞争吸收作用实现,即根系对土壤养分循环起着重要作用,是作物吸收养分的主要途径[17],而表层土壤是根系生长较为密集的区域[18],因此养分从下层土壤中向根系密集的上层运移,使得表层土(0—20 cm)养分含量较下层高。

间作系统中由于苹果的介入,引发了作物的土壤水分场和养分场的较大重叠[19],本研究中间作系统土壤养分变化系数和养分竞争激烈点位位置随空间的变化而改变,在一定程度上反映了苹果农林复合系统所承载的养分获取能力及树木与林下农作物的竞争关系。一方面,土壤养分资源作为苹果和花生生长需要的共有资源,二者必然对土壤水肥进行竞争,致使土壤养分含量减少,产生亏损;另一方面,苹果产生的凋落物通过腐殖作用将土壤养分返还给土壤,对土壤养分有增益作用[20],亏缺和增益的综合影响形成了苹果与花生竞争与互补的平衡关系。蔡崇法等[21]研究发现当养分供应不足时,必然引起植物个体的生长、发育、生态及其生态位改变,即引起养分竞争。Hagger 和 Beer[22]对刺桐(*Erythrina poeppigiana*)—玉米(*Zea mays*)间作的营养竞争所作的研究得出靠近刺桐树行的玉米生物量与生长在行中的相比下降 44%,含氮量降低 35%。Odhiambo 等[23]以银桦(*Grevillea robusta*)与玉米(*Zea mays*)间作系统产量为研究对象,结果表明间作系统中存在着养分竞争,间作的玉米产量较单作降低了 40%。云雷等[24]通过对晋西黄土区核桃与农作物间作系统土壤养分垂直分布、水平分布和土壤养分的综合效应的研究,得出核桃与间作农作物的养分关系表现为竞争关系,且竞争强度随着作物距离果树行的距离变化而变化。

本研究从微观的角度出发,随着土层加深竞争激烈位点在水平方向上发生迁移,这与花生、苹果树的根系垂直分布有关。树木根系是农林复合系统中的“安全网”,对系统养分的获取起到了积极的作用[25-27]。苹果树根系在 0—60 cm 土层中,而花生根系主要分布在 0—20 cm 耕层中,这是导致表土层(0—20 cm)和深土层(>20—60 cm)竞争激烈位点不同的根本原因。土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮的土壤养分竞争激烈位点在深土层(>20—60 cm)向靠近苹果树的位置移动的原因是在 0—20 cm 表土层中,苹果树与花生根系的生态位存在部分重叠,对养分的竞争激烈,同时由于花生种植行数多,整体对土壤养分的竞争较强,因而水平方向土壤养分竞争激烈位点离苹果行较远。在深土层,花生根系数量非常少,而苹果树根系依然分布较多,由于缺少了花生根系对养分的竞争,因而竞争激烈位点离果树行较近。有效磷

的土壤养分竞争激烈位点向远离苹果树的位置移动,可能是由于深根"养分泵"的作用导致,树木的深根如同一台"养分泵",从深层土壤中或地下水中吸收地下深层矿物的风化所产生的养分[28]。本研究中,矿物风化所产生的可利用磷元素被树木深根吸出,提高了近树位置的有效磷含量。而远离苹果树的位置无法获得足够的可利用磷元素的补充,因此造成有效磷竞争激烈位点的偏移。速效钾的土壤养分竞争激烈位点位置保持不变,是因为钾元素主要来自土壤,受其他因素影响较小。

与此同时,在宏观角度,从土壤养分变化系数的情况来看,水平区带上间作系统在果树带区对土壤总养分竞争激烈,在近果树作物区对土壤速效养分竞争激烈。此现象充分说明间作系统存在养分竞争,并且这种竞争随着水平方向上离树距离的增加而变化。养分竞争激烈的区域,主要位于果树带区[0,100 cm)和近果树作物区[100 cm,200 cm),形成这种养分分布规律的原因是由于苹果—花生间作系统中,苹果根系的水平分布范围一般在 0—200 cm,因此,在这个范围内,苹果与花生对养分的竞争十分激烈,生态位重叠值较大,土壤养分消耗强烈,土壤库养分出现低贮量区,加之林木的遮阴等作用,造成了果树对作物区的胁地现象。随着离果树距离的增加,苹果吸收根系逐渐减小,竞争逐渐变小。不同深度的土层中,有机质、有效磷的竞争主要集中于深土层,全磷、速效钾竞争主要集中于表土层,全氮和碱解氮则在不同程度上呈现合作效应。这一特征充分表明间作系统充分利用了深层土壤养分,并在一定程度上对间作系统整体生产力提高起到了积极作用。

间作系统与花生单作、苹果单作相比,对各土壤养分的需求程度有所不同,土壤养分效应值在一定程度上反映了果农复合系统中果树与农作物的竞争与互补情况,结合全国第二次土壤普查养分分级标准,可确定该地区的针对性施肥方案。本研究发现苹果—花生间作系统土壤养分效应值有正有负,总体而言,苹果—花生间作系统对土壤中的速效钾、全磷、有机质的需求量较大,在后期施肥管理中要有针对性的人工施肥,并根据有机质、全磷、速效钾竞争激烈位点位置确定施肥区域。有机质、全磷竞争激烈位点主要出现在果树带区,速效钾竞争激烈位点则主要位于作物区,因此可在果树带区施用有机肥、磷肥,作物区施入钾肥来补充养分,提高作物产量。根据全国第二次土壤普查养分分级标准对各土壤养分指标的分级情况,计算出该地区有机肥、磷肥、钾肥的施加量为 38 400,240,336 kg/hm^2。

4　结 论

(1) 苹果—花生间作系统土壤有效磷含量中等、全磷含量缺乏、有机质不足、缺氮、缺钾。变异程度大小依次为:碱解氮>速效钾>有机质>全氮>有效磷>全磷;土壤有效磷、速效钾呈正态分布,土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮经自然对数转换后符合正态分布。

(2) 水平方向上,间作系统对总养分有机质、氮、磷在果树带区竞争激烈,对有效养分氮、磷、钾在近果树作物区竞争激烈;垂直方向上,有机质、有效磷的竞争主要集中于深土层,全磷、速效钾竞争主要集中于表土层,全氮和碱解氮则在不同程度上呈现合作效应。

(3) 与各单作相比,间作系统各养分的效应表现不同。与花生单作相比,间作系统除了碱解氮外的其他 5 个养分均呈现负效应;与苹果单作相比,间作系统有机质、全磷、速效钾呈现负效应,其他为正效应。

(4) 总体而言,间作系统中苹果—花生间作系统对土壤中的有机质、全磷、速效钾的需求量较大,应在果树带区施用有机肥、磷肥,作物区施入钾肥,该地区有机肥、磷肥、钾肥的施加量为 38 400,240,336 kg/hm^2。

[参 考 文 献]

[1] 赵英,张斌,王明珠. 农林复合系统中物种间水肥光竞争机理分析与评价[J]. 生态学报,2006,26(6):1792-1801.

[2] 孟平,张劲松,高峻. 中国复合农林业发展机遇与研究展望[J]. 世界林业研究,2004,17(6):30-34.

[3] George S J, Kumar B M, Wahid P A, et al. Root competition for phosphorus between the tree and herbaceous components of silvopastoral systems in Kerala, India [J]. Plant & Soil, 1996,179(2):189-196.

[4] 毕华兴,云雷,朱清科,等. 晋西黄土区农林复合系统种间关系研究[M]. 北京:科学出版社,2011.

[5] 高飞,王若水,许华森. 晋西黄土区水肥调控对苹果玉米间作系统土壤含水量及分布的影响[J]. 中国水土保持科学,2016,14(4):94-104.

[6] Peng Xiaobang, Zhang Yuanying, Jing Cai, et al. Photosynthesis, growth and yield of soybean and maize in a tree-based agroforestry intercropping system on the Loess Plateau [J]. Agroforestry Systems, 2009,76(3):569-577.

[7] 彭晓邦,蔡靖,姜在民,等. 光能竞争对农林复合生态系统生产力的影响[J]. 生态学报,2009,29(1):545-552.

[8] Ong C K, Corlett J E, Singh R P, et al. Above and below ground interactions in agroforestry systems [J]. Forest Ecology and Management, 1991,45(1/4):45-57.

[9] Anderson L S, Sinclair F L. Ecological interactions in agroforestry systems [J]. Agroforestry Abstracts, 1993,6(2):57.

[10] Huxley P A, Pinney A, Akunda E, et al. A tree/crop interface orientation experiment with a *Grevillea robusta* hedgerow and maize [J]. Agroforestry Systems, 1994,26(1):23-45.

[11] Gao L, Xu H, Bi H, et al. Intercropping competition between apple trees and crops in agroforestry systems on the Loess Plateau of China [J]. PLoS One, 2013, 8(7): e70739.

[12] Thevathasan N V, Gordon A M. Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: Experiences from Southern Ontario, Canada [M] // New Vistas in Agroforestry. Springer, Dordrecht, 2004: 257-268.

[13] 冯良山,孙占祥,郑家明,等.辽西风沙半干旱区旱作农田水资源研究[J].土壤通报,2008(1):25-28.

[14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2016.

[15] Chander K, Goyal S, Nandal D P, et al. Soil organic-matter, microbial biomass and enzyme activities in a tropical agroforestry system [J]. Biology and Fertility of Soils, 1998,27(2):168-172.

[16] Moreno G, Obrador J J, Garcia A. Impact of evergreen oaks on soil fertility and crop production in intercropped dehesas [J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2007, 119(3/4): 270-280.

[17] 张德闪,李洪波,申建波.集约化互作体系植物根系高效获取土壤养分的策略与机制[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1547-1555.

[18] 孙文泰,董铁,刘兴禄,等.覆盖处理苹果细根分布与土壤物理性状响应关系研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):88-95.

[19] 王德利.关于生态场的几点评述[J].应用生态学报,2000,11(3):472-476.

[20] Allen S C, Jose S, Nair P K R, et al. Safety-net role of tree roots: Evidence from a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States [J]. Forest ecology and management, 2004, 192(2/3): 395-407.

[21] 蔡崇法,王峰,丁树文,等.间作及农林复合系统中植物组分间养分竞争机理分析[J].水土保持研究,2000,7(3):219-222.

[22] Haggar J P, Beer J W. Effect on maize growth of the interaction between increased nitrogen availability and competition with trees in alley cropping [J]. Agroforestry Systems, 1993,21(3):239-249.

[23] Odhiambo H O, Ong C K, Deans J D, et al. Roots, soil water and crop yield: Tree crop interactions in a semi-arid agroforestry system in Kenya [J]. Plant and Soil, 2001,235(2):221-233.

[24] 云雷,毕华兴,马雯静,等.晋西黄土区果农间作土壤养分空间分布[J].农业工程学报,2010,26(S1):292-299.

[25] Kang B T. Alley cropping-soil productivity and nutrient recycling[J]. Forest Ecology and Management, 1997, 91(1):75-82.

[26] Rowe E C, Hairiah K, Giller K E, et al. Testing the safety-net role of hedgerow tree roots by 15 N placement at different soil depths [M] // Agroforestry for Sustainable Land-Use Fundamental Research and Modelling with Emphasis on Temperate and Mediterranean Applications. Springer, Dordrecht, 1999: 81-93.

[27] Jose S, Gillespie A R, Pallardy S G. Interspecific interactions in temperate agroforestry [J]. Agroforestry Systems, 2004, 61(1/3): 237-255.

[28] 刘兴宇,曾德慧.农林复合系统种间关系研究进展[J].生态学杂志,2007,26(9):1464-1470.

(上接第42页)

[11] 张慧智,史学正,于东升,等.中国土壤温度的季节性变化及其区域分异研究[J].土壤学报,2009,46(2):227-234.

[12] 王闪闪,赵允格,石亚芳,等.短期放牧干扰对黄土丘陵区生物结皮土壤氮素累积的影响[J].应用生态学报,2017,28(12):3848-3854.

[13] 刘振华,赵英时.土壤水热耦合模型的研究[J].水土保持通报,2007,27(5):87-92.

[14] 贾东于,文军,张堂堂,等.黄土高原降水对土壤含水量和导热率的影响[J].高原气象,2014,33(3):712-720.

[15] 崔广心,李毅.含水土结冰温度的初步研究[J].冰川冻土,1993,15(2):317-321.

[16] 杨兴国,马鹏里,王润元,等.陇中黄土高原夏季地表辐射特征分析[J].中国沙漠,2005,25(1):55-62.

[17] 张勇,薛林贵,高天鹏,等.荒漠植物种子萌发研究进展[J].中国沙漠,2005,25(1):106-112.