

苹果花生间作系统土壤水分动态 及主要竞争区域

王丹¹, 毕华兴^{1,2,3}, 许华森⁴, 蔡智才¹, 常译方¹, 陈玥¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083;
3. 北京林业大学生态环境功能提升协同创新中心, 北京 102206; 4. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要: 以晋西黄土区典型苹果-花生间作系统为研究对象, 研究间作系统界面土壤水分动态变化以及土壤水分的主要竞争区域, 旨在提高该地区果农间作系统降水生产力、土壤水分利用效率。采用烘干称重法对苹果树行(行距为5 m)距苹果树不同距离处0~60 cm土层的土壤水分含量进行监测, 利用移动窗口法对土壤水分的主要竞争区域进行分析。研究表明: 花生的苗期、开花期、结荚期和成熟期, 土壤水分含量较低, 均未超过20%, 且各时期土壤水分含量差异显著, 苗期和成熟期土壤水分含量高于开花期和结荚期, 开花期土壤水分含量最低; 以距苹果树南北两侧各2.5 m为分界线, 距离果树越远, 土壤水分含量先降低再升高, 最低点在距树行1.2 m左右; 在花生各生育期, 与花生单作比较, 间作系统土壤水分皆呈现出负效应, 分别是-25.16%、-20.26%、-12.97%和-11.13%; 苹果-花生间作系统苗期的主要竞争区域是距树南侧0.8~2 m和距树北侧0.8~1.8 m, 竞争宽度2.2 m; 花生开花期的主要竞争区域为距树南侧0.8~1.8 m和距树北侧1~2 m, 结荚期和成熟期土壤水分的主要竞争宽度最小, 为1.8 m, 主要竞争区域分别是距树南侧0.8~1.8 m、距树北侧0.8~1.6 m和距树南侧0.8~1.6 m、距树北侧0.8~1.8 m。

关键词: 晋西黄土区; 苹果-花生间作系统; 土壤水分; 主要竞争区域

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

The dynamic change and the competition area of soil moisture in apple – peanut intercropping system

WANG Dan¹, BI Hua-xing^{1,2,3}, XU Hua-sen⁴, CAI Zhi-cai¹, CHANG Yi-fang¹, CHEN Yue¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Ji county station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Beijing 100083, China;

3. The Collaborative Innovation Center for Promoting Ecological Functions of Forestry and economic trees, Beijing 102206, China;

4. College of Resource and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: The objective of this study is to analyze moisture dynamic changes and the main competition area in apple – peanut intercropping system and improve the productivity of rainfall and the efficiency of soil moisture in the intercropping systems on the Loess Plateau of west Shanxi Province. Soil moisture contents between two rows of apple trees (spacing of 5 m) and at different distances from the apple trees were monitored by oven drying method. And the main competition area was investigated with the moving split window technique. Overall, soil moisture content was low and the maximum did not exceed 20% in different phenophases (including seedling stage, flowering stage, bearing pod stage and mature stage) of peanut. In addition, soil moisture content was significantly different among phenophases. The soil moisture content of seedling stage and mature stage was higher than flowering stage and bearing pod stage while the lowest was in flowering stage. Taking 2.5 m from apple trees as the dividing line, soil moisture content decreased at first and then increased with the increase of the distance from trees, and the lowest soil moisture content was detected when the distance is around 1.2 m from the trees. In four different phenophases of peanut, comparing with peanut monoculture system, soil

moisture in apple-peanut intercropping system showed negative effect, namely $-25.16\% - 20.26\% - 12.97\%$ and -11.13% . The main competition area of seedling stage was $0.8 \sim 2$ m away from the south side of apple trees and $0.8 \sim 1.8$ m away from the north side of apple trees, where the competitive width is 2.2 m. The main competition area of flowering stage was $0.8 \sim 1.8$ m away from the south side of apple trees and $1 \sim 2$ m for the north side. The minimum competitive width of soil moisture was in both bearing pod stage and mature stage which was 1.8 m simultaneously. The main competition area in bearing pod stage was $0.8 \sim 1.8$ m away from the south side of apple trees and $0.8 \sim 1.6$ m away from the north side of apple trees. Meanwhile, in the mature stage, the main competition area is $0.8 \sim 1.6$ m away from the south side of apple trees and $0.8 \sim 1.8$ m away from the north side of apple trees.

Keywords: the Loess Plateau of west Shanxi Province; apple-peanut intercropping system; soil moisture; the main competition area

黄土高原自然环境恶劣,是我国典型的生态脆弱区。而果农间作系统作为生态农业的主要形式之一,可提高当地土地利用效率,减少水土流失,增加经济收入,被当地农民广泛应用。果农间作系统中果树和农作物共享资源,必然会引起竞争。主要包括地上部分光的竞争^[1-3]和地下部分土壤水分^[4-9]、养分^[10-12]的竞争。黄土高原是我国雨养农业区之一,果树根系和农作物根系生态位重叠,土壤水分竞争比较激烈,特别是土壤水分不能同时满足果树和农作物生长发育需要。因此土壤水分的吸收、利用关系是提高经济效益、生态效益的关键因素。目前,果农间作系统中土壤水分的研究主要集中在土壤水分分布、土壤水分分布与根系的关系以及土壤水分含量与作物产量的关系等。廖文超^[4]研究发现不同树龄苹果-大豆间作系统土壤水分竞争程度不同,且随着树龄增长,大豆的生物量和产量逐渐减少。高路博^[5]研究得出苹果-大豆间作系统中大豆开花期耗水量最大,大豆苗期、开花期和结荚期土壤水分皆表现为负效应;高路博^[6]还提出苹果-大豆间作系统中土壤水分竞争对大豆的生长发育造成较大影响。但关于果农间作系统中土壤水分含量的动态变化规律以及土壤水分的主要竞争区域方面的研究则较少。本文以晋西黄土区的苹果-花生间作系统为研究对象,对土壤水分含量进行定位监测,利用移动窗口法等对土壤水分数据进行分析,分析苹果-花生间作系统在花生的4个生育期(苗期、开花期、结荚期和成熟期)土壤水分的动态变化规律以及土壤水分的主要竞争区域和竞争宽度,探讨该地区苹果-花生间作系统土壤水分利用策略,以期为晋西黄土区果农间作系统的高效可持续经营提供理论依据,提高果农间作系统的经济效益、生态效益和社会效益。

1 研究区概况

研究区位于山西省吉县,地理坐标为东经 35°

$53^{\circ}10' \sim 36^{\circ}21'02''$ 、北纬 $110^{\circ}27'30'' \sim 111^{\circ}07'20''$,属于典型的黄土高原残塬沟壑区。吉县土壤以褐土为主,黄土母质,土层深厚。吉县处于暖温带大陆性季风气候区,日照时数 2 538 h,大于 10°C 的有效积温 $3\ 361.5^{\circ}\text{C}$ 。年均无霜期 172 d,年均气温 10.2°C ,年均日较差 11.5°C 。年均降水量 522.8 mm,4—10 月降水量占全年降水量的 90% 以上,降水具有季节性变化。果农间作系统中主要经济林树种包括苹果 (*Malus pumila*)、核桃 (*Juglans regia*) 等,主要农作物包括大豆 (*Glycine max*)、花生 (*Arachis hypogaea*)、谷子 (*Setaria*) 等。据吉县政府统计,截止到 2013 年,山西吉县苹果栽植面积达 1.87 万公顷,占耕地总面积的 84.8%,是当地农民经济的主要来源之一。

2 研究方法

2.1 试验布设与土壤水分监测

根据晋西黄土区果农间作的经营特点以及实际情况,在山西省吉县东城乡柏东村苹果示范园内建立苹果-花生间作系统试验区。试验区苹果树种植于 2009 年,品种为矮化富士,树龄为 6 a,株行距为 $4\text{ m} \times 5\text{ m}$,树行走向为东西向。花生播种于 2015 年 5 月 7 日,品种为海花 1 号,株行距为 $0.3\text{ m} \times 0.4\text{ m}$,两个树行之间共种植 8 行花生,距树 1.1 m 处为第一行。本试验设 3 个面积均等的试验小区作为试验重复,每个试验小区面积 240 m^2 ,含 4 行果树及间作花生。作物单作试验样地不再划分试验小区。具体监测样点布设如图 1 所示,以中央苹果树带为中心,从南至北布设样线,样线与苹果树行垂直。以苹果树下为第一个样点,每隔 0.2 m 取一个样点,直到另一个树行,每条样线布设 26 个取样点。每个试验小区布设 3 条重复样线,共布设 9 条样线进行土壤水分的监测。花生单作样地按照 S 形布设 5 个监测样点。2015 年花生苗期(6 月 15 日)、开花期(7 月 21 日)、结荚期(8 月 19 日)和成熟期(10 月 11 日),在

各监测点采用土钻法取土,10 cm 为一层,取土深度 60 cm,采用土钻取土烘干法测定土壤水分含量。在播种花生前(5 月 6 日)和收获花生后(10 月 15 日)

对每个试验小区随机选择 10 棵苹果树进行每木检尺,结果如表 1 所示。所有试验小区生产管理措施相同,全年无灌溉。

表 1 试验区的基本情况
Table 1 Basic data of the observed site

项目 Items	树龄/a Tree age	株高/m Plant height	地径/cm Ground diameter	南北冠幅/m Crown width from south to north	东西冠幅/m Crown width from east to west
苹果树(花生种植前) Apple trees(Before planting peanut)	6	3.45	7.61	3.59	3.18
苹果树(花生收获后) Apple trees(After the peanut harvest)	6	3.47	8.12	3.68	3.24
花生(收获时) Peanut(Harvest)	—	0.23	—	0.28	0.27

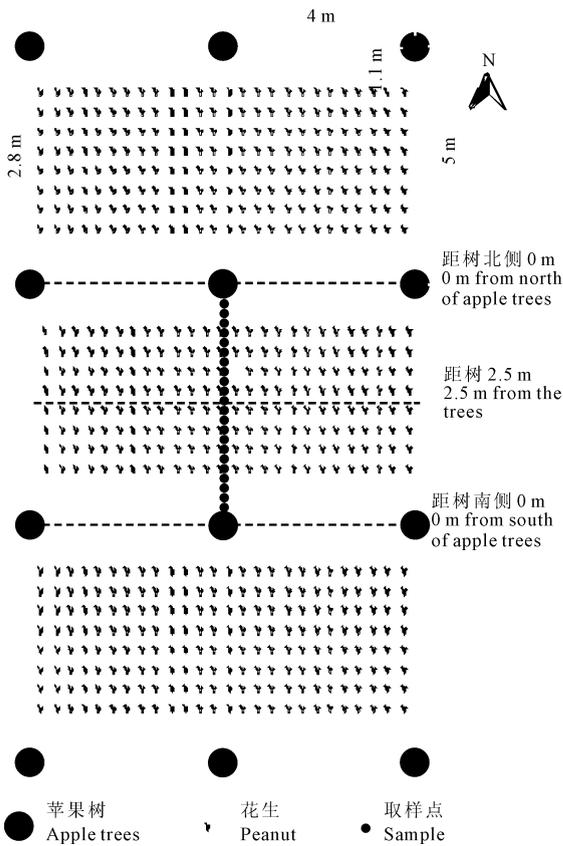


图 1 试验区土壤水分取样布设

Fig.1 Schematic diagram for soil moisture sampling of the observed site

2.2 数据处理

2.2.1 土壤水分效应 在果农间作系统中,果树和农作物根系生态位有一定程度的重叠,对土壤水分进行竞争;另一方面,果树通过遮阴作用降低土壤水分蒸发,且果树根系具有提水作用^[13-14],导致深层土壤水分有一定程度提升。本文利用土壤水分效应衡量果农间作系统对 0~60 cm 土层土壤水分产生的影响,计算公式如下:

$$E = (M - M_d) / M_d \times 100\%$$

式中, E 为土壤水分效应; M 为苹果-花生间作系统中 0~60 cm 土层土壤水分含量; M_d 为花生单作土壤水分含量。当 E 是正数时,苹果-花生间作系统有益于 0~60 cm 土壤水分含量的提升,显示为正效应;反之,当 E 是负数时,显示为负效应。

2.2.2 移动窗口法 主要采用移动窗口法^[15]判定苹果-花生间作系统的主要竞争区域和竞争宽度,判定原理如图 2 所示:将一个窗口平均分割成两个半窗口,利用欧氏距离的平方计算比较两个半窗口的相异性,按顺序将窗口向右侧移动一个取样点,再计算两个半窗口的相异性,直到窗口包含最后一个样点。利用欧氏距离的平方计算相异性的公式如下:

$$SED_b = \sum_{i=1}^k (X_{imw} - X_{imw})$$

式中, SED 是欧氏距离的平方; b 是两个半窗口的中点; k 是样点的变量数; X 是一个半窗口的均值; m 和 n 分别为两个半窗口; w 是窗口的宽度。

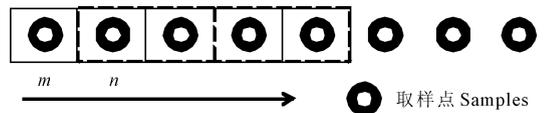


图 2 移动窗口法原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of moving split window techniques

以样点位置为横坐标,欧氏距离的平方为纵坐标作图。当曲线变化趋于稳定,有两个明显的波峰,通过半波峰法根据峰值所在的位置和峰宽可以有效地判定苹果-花生间作系统土壤水分的影响域和影响宽度。影响域范围内表示距离中心林带不同距离处土壤水分含量差异较大,果树与农作物之间的竞争比较激烈,为果农间作系统土壤水分的主要竞争

区域。

2.3 数据分析

对土壤水分含量进行统计,采用 R 语言和 Excel 2010 进行数据统计,对花生各生育期苹果-花生间作系统土壤水分含量进行差异性分析和多重比较,并运用欧式距离的平方判定土壤水分的主要竞争区域。

3 结果与分析

3.1 土壤水分时间动态变化

图 3 为苹果-花生间作系统 2015 年花生苗期、开花期、结荚期、成熟期 0~60 cm 土层土壤水分含量的动态变化。从图 3 可知,苹果-花生间作系统土壤水分含量总体较低,4 个生育期均未超过 20%。通过方差分析和多重比较,苹果-花生间作系统在花生苗期、开花期、结荚期和成熟期土壤水分含量显著差异。苗期和成熟期土壤水分含量相对较高,最高点出现在成熟期,达 18.00%。开花期和结荚期土壤水分含量较低,最低点出现在开花期,为 4.39%。可见,晋西黄土区苹果-花生间作系统在花生不同生育期土壤水分状况差异显著,经过雨季和土壤水分恢复期,花生成熟期的土壤水分含量明显高于其他三个生育期。

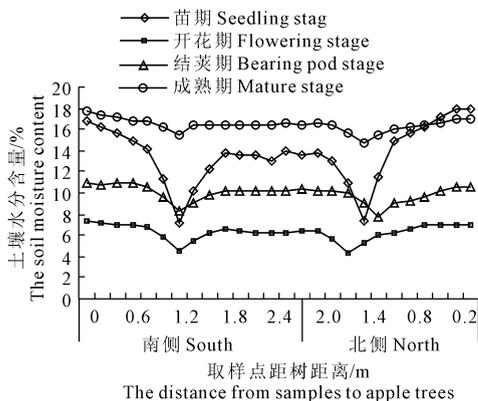


图 3 苹果-花生间作系统土壤水分状况

Fig.3 The situation of soil moisture in apple-peanut intercropping system

3.2 土壤水分水平动态变化

变异系数可以衡量组内参数的变异程度,变异系数在 0~0.1 之间为弱变异程度,0.1~1.0 之间为中等变异程度,1.0 以上为强变异程度。对苹果-花生间作系统花生苗期、开花期、结荚期和成熟期的土壤水分变异程度进行分析(表 2)可知,苹果-花生间作系统在花生苗期、开花期土壤水分处于中等变异程度,结荚期和成熟期处于弱变异程度。这说明土壤水分含量在距树不同距离处分布不均衡,特

别是花生苗期和开花期。然而,花生各生育期土壤水分含量水平变化规律较为相似(图 3),以距树南北两侧各 2.5 m(树行中间)为分界线,左右两边土壤水分含量变化规律相似,随着距树距离越远,土壤水分含量先降低再升高,最低点出现在距树 1.2 m 左右。出现此规律的原因可能是本试验距树 1.1 m 开始种植第一行作物,使距树较近区域土壤水分竞争不激烈。在距树 2.5 m 附近,土壤水分含量比较稳定,没有剧烈变化。其中,花生成熟期虽然也具有以上规律,但是距树不同距离处的土壤水分含量变化较小。

表 2 苹果-花生间作系统在花生的不同生育期土壤水分变异性

Table 2 The variability of soil moisture in different phenophases of peanut in apple-peanut intercropping system

项目 Items	苗期 Seedling stage	开花期 Flowering stage	结荚期 Bearing pod stage	成熟期 Mature stage
标准差/% Standard deviation	2.76	0.76	0.78	0.61
平均值 Average/%	13.70	6.33	9.95	16.40
变异系数 Coefficient of variation	0.20	0.12	0.079	0.04

3.3 土壤水分主要竞争区域

对苹果-花生间作系统的土壤水分效应分析发现,与花生单作比较,在花生苗期、开花期、结荚期和成熟期土壤水分皆呈现出负效应。各个生育期,土壤水分效应的平均值分别是 -25.16%、-20.26%、-12.97%和 -11.13%,苹果-花生间作系统各生育期对 0~60 cm 土层土壤水分含量整体表现为降低作用。与高路博^[16]得出的晋西黄土区苹果-花生间作系统土壤水分整体表现为负效应的结论一致。这说明晋西黄土区苹果-花生间作系统中苹果树和花生主要呈现出竞争关系。

采用移动窗口法对苹果-花生间作系统土壤水分的主要竞争区域进行分析。在花生苗期,当窗口宽度为 4、6、8、10、12、14、16 时,曲线波动较大,波峰太多,主要波峰位置不明显,无法定量判定土壤水分的主要竞争区域和竞争宽度。由图 4 可知,当窗口宽度为 2 时,曲线变化趋于稳定,有两个明显且稳定的波峰,即当窗口宽度为 2 时,可以有效地判定苹果-花生间作系统中花生苗期土壤水分的主要竞争区域和竞争宽度。苹果-花生间作系统土壤水分的相异性较大,曲线在 SED_6 和 SED_{10} 有两个明显的波峰,峰宽分别是 $SED_4 - SED_{10}$ 和 $SED_{16} - SED_{21}$,通过半波峰法可以判定苹果-花生间作系统中花生苗期土壤

水分的主要竞争区域为距树南侧 0.8~2.0 m 和距树北侧 0.8~1.8 m, 竞争宽度分别为 1.2 m 和 1 m。与花生苗期相同, 当窗口宽度为 2 时, 苹果-花生间作系统在花生开花期曲线有两个明显且稳定的波峰, 可以判定该生育期土壤水分的主要竞争区域和竞争宽度。由半波峰法可知, 土壤水分的主要竞争区域是距树南侧 0.8~1.8 m 和距树北侧 1~2 m, 竞争宽度皆为 1 m。在花生结荚期, 窗口宽度为 2 时, 在 SED₆ 和 SED₁₉ 有两个明显且稳定的波峰, 可以有

效地辨析土壤水分的主要竞争区域。主要竞争区域是距树南侧 0.8~1.8 m 和距树北侧 0.8~1.6 m, 竞争宽度分别是 1 m 和 0.8 m。与上述花生的三个生育期相同, 当窗口宽度为 2 时, 可以有效地判定苹果-花生间作系统花生成熟期土壤水分的主要竞争区域。曲线在 SED₇ 和 SED₁₈ 有两个明显且稳定的波峰, 由此判定该生育期土壤水分的主要竞争区域是距树南侧 0.8~1.6 m 和距树北侧 0.8~1.8 m, 竞争宽度分别为 0.8 m 和 1 m。

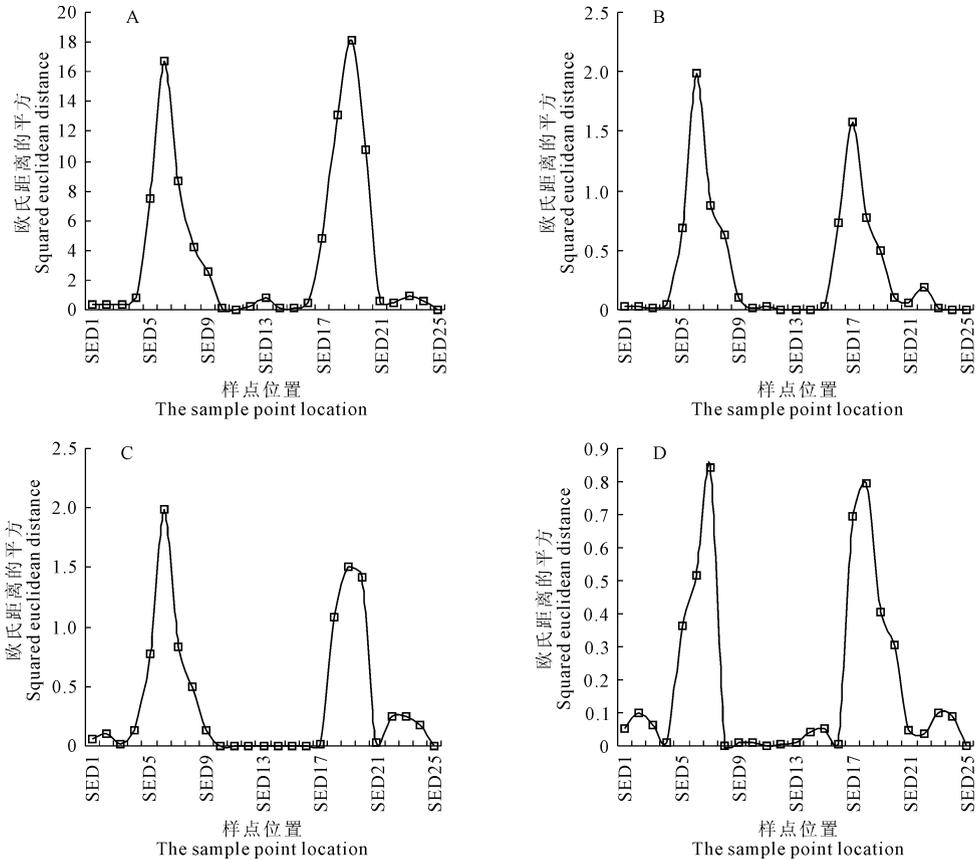


图 4 苹果-花生间作系统在花生苗期(A)、开花期(B)、结荚期(C)、成熟期(D)土壤水分的相异性
 Fig.4 The dissimilarity of soil moisture for seedling stage(A), flowering stage(B), bearing pod stage(C) and mature stage(D) of peanut in apple-peanut intercropping system

从结果分析可知, 苹果-花生间作系统在花生苗期土壤水分的主要竞争区域宽度最大, 为 2.2 m; 结荚期和成熟期的主要竞争区域宽度最小, 皆为 1.8 m。这说明花生苗期土壤水分竞争最为激烈, 其次是开花期, 竞争最平缓的是结荚期和成熟期。由图 4 可知, 在花生苗期, 土壤水分含量水平相异性最大, 明显大于开花期、结荚期和成熟期, 且成熟期土壤水分的相异性最小。这主要是因为花生苗期果树和花生处于迅速生长期, 消耗水分较多, 土壤水分竞争最为激烈。在花生开花期和结荚期, 果树和花生消耗水分较少, 竞争得到一定程度缓解, 导致成熟期距树不同距离处土壤水分差异越来越不明显。

4 讨论

田阳^[9]、高路博^[5-6]、廖文超^[4]等研究表明晋西黄土区主要果农间作系统苹果-花生间作系统、苹果-大豆间作系统、核桃-花生间作系统、核桃-大豆间作系统、核桃-谷子间作系统 0~60 cm 土层土壤平均水分含量最高值是 19.63%。本研究中苹果-花生间作系统在花生苗期、开花期、结荚期和成熟期土壤水分含量的最高值为 18.00%, 出现在成熟期(雨季后)。这说明晋西黄土区果农间作系统土壤水分含量整体较低, 均未超过 20%。

在花生苗期、开花期、结荚期和成熟期, 土壤水

分含量的水平变异规律相似,以距树南北两侧 2.5 m 为分界线,随着距树越远,土壤水分含量先降低再升高,最低点出现在距树 1.2 m。距树南北两侧 2.5 m 附近土壤水分含量基本无变化。田阳^[9]、高路博^[5]等研究表明苹果-花生间作系统随着距树距离越远,土壤水分含量先增加后减少,最低点出现在距树 0 m。这主要是因为本研究中距苹果树 1.1 m 处开始种植花生,一定程度上缓解了树下土壤水分的竞争。

5 结 论

与花生单作相比,4 个生育期土壤水分皆显示为负效应,即间作系统中苹果树和花生在 0~60 cm 土层对土壤水分整体表现为竞争作用。花生苗期土壤水分竞争最为激烈,该时期土壤水分含量处于中等变异程度;主要竞争区域达 2.2 m,分别为距树南侧 0.8~2 m 和距树北侧 0.8~1.8 m。开花期土壤水分竞争仍然较为激烈,主要竞争区域为距树南侧 0.8~1.8 m 和距树北侧 1~2 m,竞争宽度为 2 m。结荚期和成熟期土壤水分竞争得到一定程度缓解,距树不同距离处的土壤水分含量处于弱变异程度,竞争宽度皆为 1.8 m。晋西黄土区,土层深厚,且地下水埋藏很深,果农间作系统全年无灌溉,土壤水分的主要来源为降雨。建议苗期和开花期在间作系统中土壤水分的主要竞争区域进行薄膜覆盖或者植物秸秆覆盖,减少土壤水分蒸发;同时根据地势建设雨水集蓄工程,对降雨进行富集,引导雨水到土壤水分的主要竞争区域,从而提高降雨生产力,增大苹果-花生间作系统经济效益。

本文研究了不同生育期土壤水分的水平动态变化规律以及土壤水分的主要竞争区域。但土壤水分主要竞争区域与植物根系的关系、植物根系分布与植物土壤水分利用能力的相互影响关系以及苹果农作物与间作系统的耗水规律等需要深入研究。

参 考 文 献:

- [1] 史晓丽,郭小平,毕华兴,等.晋西果农间作光竞争及产量研究[J].北京林业大学学报,2009,31(S2):115-118.
- [2] 孙守家,孟平,张劲松,等.华北石质山区核桃-绿豆复合系统氮同位素变化及其水分利用[J].生态学报,2010,30(14):3717-3726.
- [3] Charbonnier F, Maire G L, Erwin Dreyer, et al. Competition for light in heterogeneous canopies: Application of MAESTRA to a coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry system[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2013,181(21):152-169.
- [4] 廖文超,毕华兴,赵云杰,等.晋西苹果+大豆间作土壤水分分布及其对大豆生长的影响[J].中国水土保持科学,2014,12(1):24-28.
- [5] 高路博,毕华兴,许华森,等.晋西苹果-大豆间作土壤水分的时空分布特征[J].水土保持通报,2014,34(6):327-331,337.
- [6] 高路博,毕华兴,许华森,等.晋西幼龄苹果×大豆间作的土壤中水分、养分空间分布特征及对大豆的影响[J].中国农学通报,2013,29(24):36-42.
- [7] McIntyre B D, Riha S J, Ong C K. Competition for water in a hedge-intercrop system[J]. Field Crops Research, 1997,52(1):151-160.
- [8] Padovan M P, Cortez V J, Navarrete L F, et al. Root distribution and water use in coffee shaded with *Tabebuia rosea* Bertol. and *Simarouba glauca* DC. compared to full sun coffee in sub-optimal environmental conditions[J]. Agroforestry Systems, 2011,89(5):1-12.
- [9] 田阳,周玉喜,云雷,等.晋西黄土区苹果-农作物间作土壤水分研究[J].水土保持研究,2013,20(2):29-32,37.
- [10] 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.
- [11] 蔡崇法,王峰,丁树文,等.间作及农林复合系统中植物组间养分竞争机理分析[J].水土保持研究,2000,7(3):219-221,252.
- [12] Peng X, Zhang Y, Cai J, 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.
- [13] Lei Yun, Huaxing Bi, Lubo Gao, et al. Soil moisture and soil nutrient content in walnut-crop intercropping systems in the loess plateau of China[J]. Arid Land Research & Management, 2012,26(4):285-296.
- [14] 何春霞,陈平,孟平,等.华北低丘山区果药复合系统间作水分利用策略[J].植物生态学报,2016,40(2):151-164.
- [15] Ludwig J A, Cornelius J M. Locating discontinuities along ecological gradients[J]. Ecology, 1987,68(2):448-450.
- [16] 高路博,毕华兴,许华森,等.晋西黄土区幼龄苹果+花生间作地土壤水分的时空分布特征[J].中国水土保持科学,2013,11(4):93-98.
- [17] Choesin D, Boerner R E J. Vegetation boundary detection: a comparison of two approaches applied to field data[J]. Plant Ecology, 2002,158(1):85-96.
- [18] Fortin M J. Edge detection algorithms for two-dimensional ecological data[J]. Ecology, 1994,75(75):956-965.
- [19] 牛亚菲,宋涛,刘春风,等.基于要素叠加的旅游景区经济影响域空间分异——以八达岭长城景区为例[J].地理科学进展,2010,29(2):225-231.
- [20] 刘世梁,温敏霞,崔保山,等.道路影响域的界定及其空间分异规律——以纵向岭谷区为例[J].地理科学进展,2008,27(4):122-128.
- [21] 殷少美,金晓斌,周寅康,等.基于主成分分析法和 AHP-GEM 模型的区域新增建设用地指标合理配置——以江苏省为例[J].自然资源学报,2007,22(3):372-379.
- [22] 石培礼,李文华.生态交错带的定量判定[J].生态学报,2002,(4):586-592.
- [23] 云雷,毕华兴,马雯静,等.晋西黄土区林草复合系统土壤养分分布特征及边界效应[J].北京林业大学学报,2011,33(2):37-42.
- [24] 李丽光,何兴元,李秀珍,等.岷江上游花椒地/林地边界土壤水分影响域的定量判定[J].应用生态学报,2006,17(11):2011-2015.
- [25] 王晓,张克斌,杨晓晖,等.半干旱区湿地-干草原交错带边界判定及其变化[J].生态学报,2012,32(16):5121-5127.