

农林复合系统中物种间水肥光竞争机理分析与评价

赵 英, 张 斌*, 王明珠

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 低丘红壤农林复合系统被认为能通过引入树木而利用土壤深层水分及防治水土流失, 从而作为亚热带地区应对季节性干旱的有效利用方式。然而, 复合也可引起光能、水分和养分的竞争, 导致农作物减产。通过作物生长量的测定、利用多年监测的土壤水文数据、¹⁵N 微区试验及光合有效辐射的测量, 综合探讨了南酸枣-花生复合系统引起的物种间水肥光的变化; 通过其交互作用形成的协同/竞争关系分析, 较为全面地评价了农林复合系统水肥光竞争特征。研究表明: 低丘红壤上南酸枣与花生复合, 促进了南酸枣生长, 却减小了 20% ~ 50% 的花生产量和生物量。其原因不单是南酸枣遮荫引起复合花生光合有效辐射减弱, 还与水、肥竞争有关。复合系统在旱季加大利用 50 ~ 100 cm 土层土壤水分, 从而缓冲了干旱造成的影响; 但南酸枣与花生间作系统也存在着一定的水分竞争。复合使得南酸枣能够利用施于花生区及淋失到 60 cm 深处的养分, 提高了养分的利用率; 但同时也导致养分的竞争并影响花生的生长。在花生产量、生物量受复合南酸枣竞争影响因子中, 以光最大、养分其次、水分最小。农林复合系统水肥光交互作用因其组分类型与时空配置而异, 需从生态、经济、社会效益方面对复合模式加以优化。

关键词: 低丘红壤; 农林复合系统; 水肥光竞争机理

文章编号: 1000-0933(2006)06-1792-10 中图分类号: S162, S181 文献标识码: A

Assessment of competition for water, fertilizer and light between components in the alley cropping system

ZHAO Ying, ZHANG Bin*, WANG Ming-Zhu (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1792 ~ 1801.

Abstract: Alley cropping systems can positively utilize deep soil water and leached nitrogen in the dry season, and help prevent soil and water erosion in the rainy season. In the surface soil, however, competition for nitrogen and water, and above the ground the competition for sunlight between the components may occur. The objective of this paper was to assess the alley cropping system, consisting of *Choerospondias axillaris* trees and peanut (*Arachis hypogaea*) plants in subtropical China in terms of uses of soil water, soil nitrogen and light. ¹⁵N injection experiments were carried out to determine N use by tree and crop. Spatial variations of photosynthetic available radiation (PAR) were measured to determine the shadowing effect. Spatial and temporal variations of soil water regime were monitored to determine the competition for water between the trees and peanut plants. In addition, crop and tree growth were also recorded.

Compared to the tree alone systems, alley cropping systems encouraged the fast growth of the trees, and depressed the biomass and yield of peanut by 20% to 50%. The impact of PAR was profound and had a negative relationship to the biomass and yield of peanut plants. The spatial and temporal variations of soil water regime indicated that the tree utilized soil water beneath the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49701008); the International Foundation of Sciences (IFS) (D/2872-1) 和 the International Atomic Energy Association (IAEA) (D1-CPR-10407)

收稿日期: 2005-03-24; **修订日期:** 2005-11-07

作者简介: 赵 英 (1979 ~), 男, 甘肃西和人, 硕士, 主要从事农业生态研究. E-mail: zhaoying@issas.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bzhang@issas.ac.cn

致谢: 王兴祥副研究员参加了氮素田间试验工作, 特此致谢!

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 49701008), the International Foundation of Sciences (IFS) (D/2872-1) and the International Atomic Energy Association (IAEA) (D1-CPR-10407)

Received date: 2005-03-24; **Accepted date:** 2005-11-07

Biography: ZHAO Ying, Master, mainly engaged in agricultural ecology. E-mail: zhaoying@issas.ac.cn

surface layer and alleviated the seasonal drought. Competition for soil water between the tree and peanut plant occurred at the beginning of the dry season. Compared with the mono – peanut cropping system, the alley cropping system decreased ^{15}N recovery by peanut plant and increased ^{15}N recovery by the tree, indicating that the tree utilized soil nitrogen leached to 60 cm depth. The yield and biomass of peanut plants were influenced mostly by light, but also by fertilizer and water. The results suggest that these competitions for resources must be taken account to optimize the alley cropping system.

Key words: udic ferrosol; alley cropping systems; competition for water, fertilizer and light

长期以来,我国南方低丘红壤区广泛开展了农林复合经营,通过利用物种间的生态互补功能,而成为当地防治水土流失、充分利用水肥光热资源、提高系统生产力的重要对策^[1,2]。更为甚者,由于该区雨热不完全同季、降雨超前于蒸发往往导致季节性干旱,农林复合也被设想为通过其对土壤理化性状的改善以及树木根系对该地丰富而稳定的深层土壤水分的吸提,进而减轻季节性干旱对间作农作物胁迫的可能途径^[3]。然而,农林复合后植物组分之间也存在水肥光资源竞争,导致作物减产,往往影响了这一土地利用方式的推广和实施。

我国农林复合历史悠久,可是对其生态功能尚缺乏系统深入的认识^[4,5]。目前,就生态位理论研究群落物种间竞争关系取得了很大的发展,但竞争理论在理解和比较上存在着一些冲突,仍需进一步深化^[6-8];农林间作系统水肥光得失分析以往因配置品种及其监测时段差异也得出了相悖之结论^[9-11]。长期以来,该区广泛开展了南酸枣与花生复合经营,但对其生态功能缺乏有效的分析。为此,开展不同树龄南酸枣与花生复合种间竞争邻域试验,探讨其竞争机制,为寻求避免组分间负向作用的有效措施,优化和调控农林复合模式有着重要意义。本文根据近年来对低丘红壤农林复合系统光照、养分、水分利用方面的一些研究成果^[12,13],将就物种间水肥光交互作用所形成的竞争机理进行分析,探讨其竞争影响范围和大小,以期在南酸枣花生复合系统这一生态模式做出系统综合的评价,为农林复合技术的推广应用和山地丘陵地区水土保持及生态环境建设提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 试区概况

试区地处赣东北鹰潭市的中国科学院红壤生态实验站水土保持试验区(28°15'N, 116°55'E),属亚热带湿润气候。年均气温 17.6 °C, ≥ 10 °C 积温为 5527.6 °C,年均降水量 1794 mm,蒸发量 1318 mm;试验地为低丘岗地,海拔 38 ~ 45 m,坡度 5 ~ 8°,土壤为第四纪红粘土发育的典型红壤,中国土壤系统分类定名为普通粘化湿润富铁土。植被原为马尾松(*Pinus massoniana* L.)疏林草地,1999 年初砍树后建试验小区,9 龄南酸枣树(相对于 1999 年,通称大树)和 4 龄南酸枣树(小树)整枝后当年 3 月移入,4 月上旬间种花生,并开始有关的监测。花生单作区域施用 80.5 kg hm⁻² N 肥、43 kg hm⁻² P 肥和 112 kg hm⁻² K 肥,南酸枣间作处理花生单位面积施肥量与单作花生相同。南酸枣移栽前,每兜施用钙镁磷肥 0.5 kg,移栽以后,南酸枣单作处理不再施肥,间作南酸枣种植带 1.3 m 范围内不再施肥。试区总面积 4500 m²(坡长 75 m × 宽 60 m),顺坡等高布局 3 个区组(3 次重复),组间距 6 m;每区组设 5 个小区,区间距亦为 6 m。小区面积为 120 m²(长 20 m × 宽 6 m),四周用水泥板围栏(插入土中 50 cm,露出地表 30 cm,以防区内外径流交换),分别为花生单作(简称 P,下同)、南酸枣小树单作(T1)和南酸枣大树单作(T2)、南酸枣小树花生间作(T1P)和南酸枣大树花生间作(T2P)共 5 个处理,15 个小区随机排列。栽树区大树 3 行,行距 8m,每行 3 株,株距 2m。小树区头年 5 行,行距 4m,每行 3 株,株距 2m,第 2 年改为 3 行 3 株,同大树。树区外两侧各按行栽同类树 1 株作为保护行。

1.2 水分测定

为了定位监测土壤水分的动态变化(2000 ~ 2002 年),分别在每个小区中间树行中间树两侧 50 cm 处安装张力计和中子管。其中西侧为中子管,管长 2 m,每套小树区、花生单作区 3 根、大树区 4 根,垂直排列于树行,距树行 0 m、1 m、2 m 与 4 m,打洞插入土中,用 LNW-50C 型中子仪每隔 10 cm(20 ~ 100 cm)、20 cm(100 ~ 200 cm)5 d 一次探测土层中子读数,土壤表层用烘干法测定。树东侧张力计每套 5 根,长度分别为 10 cm、30 cm、

100 cm、150 cm 和 180 cm 插入土中,隔天记录张力计读数。花生单作区安装为对应位置。

1.3 养分测定

2000年4月开始¹⁵N微区试验。首先,截断南酸枣可能相互干扰的根系,将塑料膜埋藏在树间0~70 cm土层;然后,在P、T1P和T2P小区中布置¹⁵N微区。在距测试南酸枣两侧70 cm处,布置铁框(埋入土中10 cm,露出地面10 cm)构建试验微区(长0.5 m×宽0.5 m×高0.2 m)测定表层氮素利用,氮肥为21.50%丰度的(NH₄)₂SO₄。亚表层氮素利用直接注射20.38%丰度的KNO₃进入35 cm及55 cm深度土壤,模拟淋溶进入该层次土壤的氮素。花生成熟期分别取花生荚、秸秆、南酸枣树叶和枝条、土壤等样品,在70℃烘24 h后,磨碎过60目筛,用同位素元素质谱进行¹⁵N分析^[13]。

1.4 光及作物生长测定

花生开花结荚期(2001年7月)用澳大利亚CID公司产的CI301PS光合作用测定仪晴天逐行测定花生光合有效辐射(简称PAR),以单作花生平均光合有效辐射值为100%计,计算每行花生日平均相对光合有效辐射值。利用平均木法测定南酸枣生物量^[14],按行收获并晒干测定花生荚产量与生物量。同时,2003年4月挖坑对根系的分布进行了分析。

2 结果与分析

2.1 物种间水肥光竞争分析

从表1看出,复合促进了南酸枣树的生长,复合区株高、胸径和树冠均较单作区增长快,大树比小树增幅更大。南酸枣与花生间作对花生交互遮荫作用明显,与单作花生相比,复合导致花生主茎伸长,分枝次数与叶

表1 南酸枣树生长,花生生育性状、产量及生物量变化

Table 1 Growing and developing of tree and peanut plant, yield and biomass of peanut plant

种植类型 Plant type	测定项目 Item	年份 Year			
		1999	2000	2001	2002
T1	株高 Height(m)	1.84 ± 0.09	2.17 ± 0.11	3.39 ± 0.36	3.86 ± 0.47
	胸径 Stem diameter(cm)	1.25 ± 0.15	2.74 ± 0.19	3.74 ± 0.41	4.99 ± 0.63
	树冠 Canopy size(m)	—	—	2.53 ± 0.26	3.2 ± 0.31
T2	株高 Height(m)	2.94 ± 0.12	3.25 ± 0.08	4 ± 0.15	4.56 ± 0.22
	胸径 Stem diameter(cm)	4.79 ± 0.47	6.51 ± 0.23	6.72 ± 0.06	7.56 ± 0.05
	树冠 Canopy size(m)	—	—	2.97 ± 0.33	4.19 ± 0.12
T1P	株高 Height(m)	2.1 ± 0.20	2.43 ± 0.12	4.02 ± 0.21	4.57 ± 0.28
	胸径 Stem diameter(cm)	1.43 ± 0.13	3.16 ± 0.26	4.57 ± 0.20	6.11 ± 0.30
	树冠 Canopy size(m)	—	—	2.6 ± 0.34	3.81 ± 0.37
T2P	株高 Height(m)	2.94 ± 0.01	3.62 ± 0.16	5.35 ± 0.40	5.73 ± 0.35
	胸径 Stem diameter(cm)	5.92 ± 0.67	7.76 ± 0.34	8.81 ± 0.55	10.66 ± 0.76
	树冠 Canopy size(m)	—	—	3.6 ± 0.22	4.75 ± 0.20
P	主茎高 Main axis height(m)	—	—	28 ± 0.41	42.2 ± 1.3
	分枝次数 Branching frequency(次 棵 ⁻¹)	—	—	5.1 ± 0.1	5.7 ± 0.5
	叶片数 Number of leaf(片 棵 ⁻¹)	—	—	63.7 ± 0.6	61.9 ± 1.0
T1P	主茎高 Main axis height(m)	—	—	29.5 ± 0.3	35.8 ± 0.8
	分枝次数 Branching frequency(次 棵 ⁻¹)	—	—	3.9 ± 0.2	3.2 ± 0.3
	叶片数 Number of leaf(片 棵 ⁻¹)	—	—	61.3 ± 2.9	67.1 ± 1.5
T2P	主茎高 Main axis height(m)	—	—	30.8 ± 2.6	33 ± 3.2
	分枝次数 Branching frequency(次 棵 ⁻¹)	—	—	3.5 ± 0.4	2.8 ± 0.0
	叶片数 Number of leaf(片 棵 ⁻¹)	—	—	59.4 ± 0.4	72.8 ± 1.5
P	花生产量 Yield of peanut(kg hm ⁻²)	1390.5 ± 24.2	1587 ± 112.9	2360.9 ± 104.7	2289 ± 126.9
	藤秆生物量 Biomass of peanut(kg hm ⁻²)	2473.3 ± 118.08	1101.7 ± 113.78	1870.4 ± 110.5	1779.5 ± 76.8
T1P	花生产量 Yield of peanut(kg hm ⁻²)	869.1 ± 73.5	1451.3 ± 113.2	1235.1 ± 50.3	876.8 ± 97.3
	藤秆生物量 Biomass of peanut(kg hm ⁻²)	2179.5 ± 108.4	1073.3 ± 65.1	906.1 ± 34.4	986.8 ± 45.9
T2P	花生产量 Yield of peanut(kg hm ⁻²)	1097.5 ± 109.8	1468.4 ± 52.5	1513.2 ± 50.9	1288.7 ± 42.8
	藤秆生物量 Biomass of peanut(kg hm ⁻²)	2342.5 ± 226.5	1119 ± 18.8	1170.7 ± 56.2	1133.4 ± 55.2

* 3个重复平均值 ± 标准误差 Mean ± standard error(SE) of 3 separate experiments

片数减少,并进而影响其产量和生物量。在同样施肥管理条件下,年花生产量单作区高于复合区 7.4% ~ 62.0%。以 2001 年为例,即使就可比花生种植面积而言,与 P 处理相比,T1P 处理中花生产量和生物量分别降低了 35.9%、37.9%,T2P 处理中分别降低了 44.6%、43.2%。随离树距离越远,花生生长量越高,大树中间行产量和生物量分别为单作花生的 78.3%、77.6%,而树两侧 3~4 行花生产量和生物量仅为单作花生的 35.0% ~ 52.0%。

林间距南酸枣树由近而远 1~14 行(由于 14 行花生等距种植在南酸枣树行中间,因此,第 1 行和第 14 行花生距树距离相等,余者类推)花生相对光合有效辐射值日变化表明(图 1),8:00 幼树间第 12~14 行和大树间第 9~14 行花生相对光合有效辐射值 < 50%;12:00 大树两侧 2 行(1~2 行和 13~14 行)花生光合有效辐射值 < 40%,小树两侧第 1~2 行花生光合有效辐射值 < 40%;16:00 遮荫方向恰好相反,且光合有效辐射值更低,幼树间 1~6 行和大树间第 1~9 行花生相对光合有效辐射值 < 30%;然而 3 个时刻中间行花生光合有效辐射值多 > 90%。可见花生各行相对光合有效辐射值主要与距南酸枣树行远近及树龄有关,复合对离树较近的两侧花生造成了严重的影响。

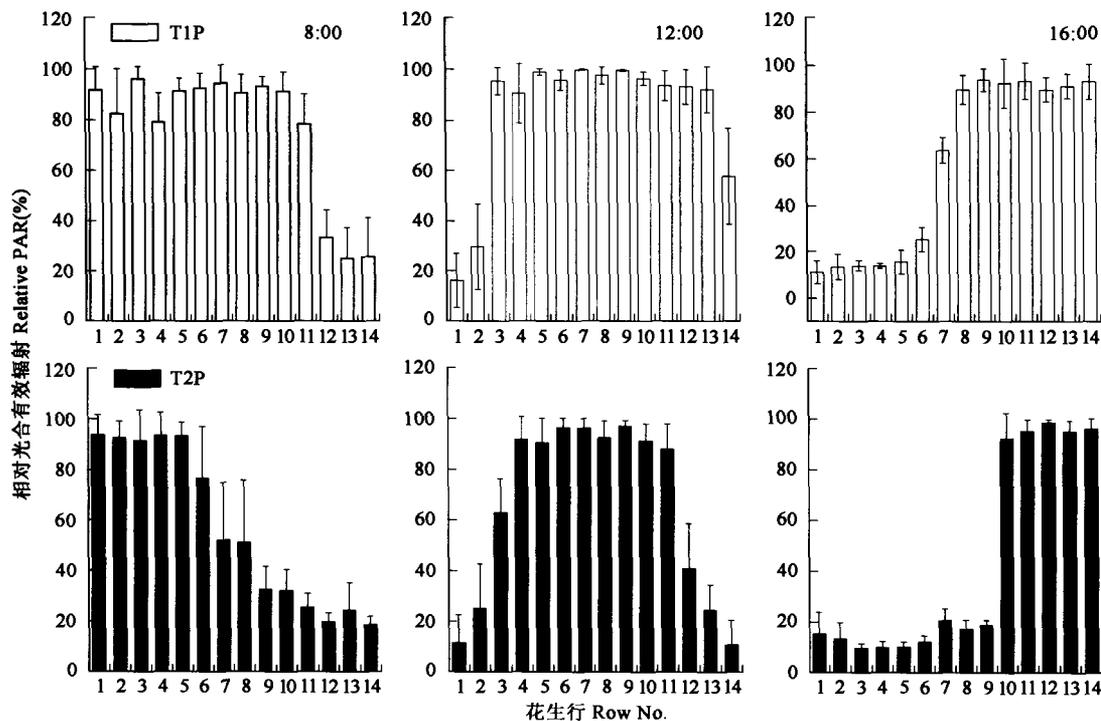


图 1 间作系统花生相对光合有效辐射日变化

Fig.1 Variation of relative PAR of intercropping peanut plant

无论常规表层施肥,还是模拟淋溶施肥,单作花生微区产量都显著高于间作花生产量(表 2)。表层施肥,T1P 和 T2P 处理中花生产量分别为单作的 62.9%、40.4%;模拟淋溶施肥深度 35 cm 和 55 cm 中,T1P 和 T2P 处理花生产量分别为单作的 47.6%、48.8%和 29.7%、30.6%。由此也可看出,施肥深度影响花生产量。花生产量随施肥深度增加而降低;单间作系统比较而言,模拟淋溶施肥 35 cm 和 55 cm 产量没有显著差异。至于南酸枣生物量,不同施肥深度间作系统中没有显著差异,但都显著高于同龄单作南酸枣。

农林间作显著降低花生对氮肥的利用率,而且树龄愈大影响愈重(表 2)。常规表层施肥处理下,P 处理中花生对氮肥的利用率为 24.7%,而 T1P 和 T2P 处理中花生对氮肥利用率分别减少为 15.1%、9.9%,可见南酸枣与花生间存在着一定的氮素竞争。南酸枣小树和大树分别竞争利用了施于毗邻花生区 9.7%、30.2%的氮肥,南酸枣大树对施于花生的氮肥的利用率甚至高于花生本身,这主要与南酸枣根系分布有关。土壤 0~100 cm 隔 20 cm 分 5 个层段,对南酸枣树根系分布与根重测定表明(表 3),南酸枣根系分布深达 80 cm(小树)~

100 cm(大树)土层,根系总量由上而下递减。小树根重第 1 层占 52.0% ~ 57.5%,第 2 层占 24.0% ~ 36.0%;大树根重第 1 层占 43.0% ~ 45.6%,第 2 层占 17.0% ~ 27.3%;而花生根量几乎全部集中于 1、2 层,分别占 96.3%、3.5%。南酸枣复合与单作比较,小树与大树根量分别增重 30.2%、81.5%;杆、枝、叶重也相应增加,说明复合对南酸枣生长具有促进作用,复合区的南酸枣主要由于种植花生施肥,对养分的利用极大地促进了其根系的生长。小树根系在表层分布的绝对数量显著低于大树,因此导致小树对表施氮素的利用率较低。深层模拟淋溶试验表明,对模拟淋溶至 35 ~ 40 cm 及 55 ~ 60 cm 土层的氮素,随深度增加氮素利用率下降,大树更能利用深层的氮素。小树根系的 15% 分布在 40 ~ 60 cm 土层;而大树根系的 20% 分布在 40 ~ 60 cm 土层。因此,南酸枣小树对模拟淋溶至 55 cm 土壤深处氮素的利用率仅为 0.87%;而南酸枣大树仍然高达 14.74%。

表 2 不同施肥深度对氮素利用率变化及产量的影响

Table 2 ¹⁵N recovery, yields of peanut plant and biomass of tree in the micro-plots as affected by depth of fertilization

处理 Treatment	施肥深度 (cm) Fertilization depth	产量 Yield(g m ⁻²)		花生氮肥利用 率 (%) N recovery	树生物量 (kg tree ⁻¹) Biomass of tree	树氮肥利用 率 (%) N recovery
		花生颗粒 Peanut grain	花生杆 Peanut straw			
P	10 ~ 15	103.51 ± 9.89	66.01 ± 2.68	24.26 ± 1.33		
	35 ~ 40	81.45 ± 2.02	42.87 ± 2.88	8.10 ± 0.84		
	55 ~ 60	71.15 ± 4.63	37.49 ± 3.35	0.91 ± 0.14		
T1P	10 ~ 15	65.06 ± 1.86	45.69 ± 2.52	15.09 ± 3.18	4.42 ± 0.16	9.66 ± 1.40
	35 ~ 40	38.77 ± 4.59	30.00 ± 2.41	4.52 ± 0.11	4.56 ± 0.39	2.29 ± 0.47
	55 ~ 60	34.71 ± 3.33	33.49 ± 3.35	1.22 ± 0.38	4.69 ± 0.44	0.87 ± 0.22
T2P	10 ~ 15	41.80 ± 3.09	36.85 ± 1.08	9.93 ± 0.81	15.06 ± 0.58	30.15 ± 6.74
	35 ~ 40	24.18 ± 2.01	20.30 ± 0.96	0.79 ± 0.08	16.77 ± 0.34	33.79 ± 6.74
	55 ~ 60	21.79 ± 1.34	19.42 ± 0.52	0.47 ± 0.10	15.03 ± 1.64	14.74 ± 2.95

* 3 个重复平均值 ± 标准误差 Mean ± standard error(SE) of 3 separate experiments

表 3 南酸枣树根系分布与根重测定

Table 3 Roots distribution and weight of *Choerospondias axillaries* tree

处理 Treat- ments	土层深度 (cm) Soil depth	根系烘干重 Root weight in dry matter (kg)				杆枝叶烘干重 Tree weight in dry matter (kg)			
		细根 (< 2 mm) Fine root	粗根 (2 ~ 10 mm) Coarse root	骨骼根 (> 10 mm) Skeleton root	总量 Total	主杆 Stem	侧枝 Branch	叶 Leaves	总量 Total
T1	0 ~ 20	0.15 ± 0.05	0.16 ± 0.02	3.33 ± 1.35	3.64 ± 1.41	6.87 ± 1.49	8.56 ± 0.71	2.70 ± 0.35	19.48 ± 1.57
	20 ~ 40	0.11 ± 0.04	0.27 ± 0.06	2.15 ± 0.72	2.53 ± 0.77				
	40 ~ 60	0.16 ± 0.06	0.17 ± 0.09	0.31 ± 0.09	0.64 ± 0.10				
	60 ~ 80	0.07 ± 0.01	0.09 ± 0.03	0.04 ± 0.04	0.20 ± 0.02				
	80 ~ 100	0	0	0	0				
	Subtotal	0.49 ± 0.12	0.69 ± 0.13	5.83 ± 1.03	7.01 ± 0.95				
T1P	0 ~ 20	0.16 ± 0.03	0.32 ± 0.06	4.77 ± 0.90	5.25 ± 0.94	9.73 ± 0.59	9.38 ± 0.85	3.08 ± 0.48	23.72 ± 1.52
	20 ~ 40	0.16 ± 0.04	0.27 ± 0.12	1.78 ± 0.84	2.20 ± 0.94				
	40 ~ 60	0.14 ± 0.08	0.25 ± 0.08	0.93 ± 0.51	1.32 ± 0.65				
	60 ~ 80	0.18 ± 0.13	0.10 ± 0.05	0.07 ± 0.07	0.36 ± 0.26				
	80 ~ 100	0	0	0	0				
	Subtotal	0.64 ± 0.28	0.94 ± 0.20	7.55 ± 0.56	9.13 ± 0.66				
T2	0 ~ 20	0.16 ± 0.04	0.21 ± 0.06	5.63 ± 0.86	6.00 ± 0.87	22.20 ± 1.41	12.53 ± 0.82	4.88 ± 1.33	37.07 ± 2.40
	20 ~ 40	0.22 ± 0.05	0.38 ± 0.06	1.64 ± 0.70	2.24 ± 0.79				
	40 ~ 60	0.18 ± 0.07	0.42 ± 0.18	3.41 ± 1.92	4.01 ± 1.73				
	60 ~ 80	0.18 ± 0.03	0.35 ± 0.07	0.25 ± 0.02	0.78 ± 0.10				
	80 ~ 100	0.07 ± 0.04	0.07 ± 0.05	0	0.14 ± 0.07				
	Subtotal	0.81 ± 0.14	1.43 ± 0.32	10.93 ± 0.61	13.17 ± 0.27				
T2P	0 ~ 20	0.19 ± 0.08	0.22 ± 0.08	9.87 ± 3.32	10.28 ± 3.39	28.90 ± 3.41	26.52 ± 4.00	12.00 ± 3.75	63.41 ± 9.48
	20 ~ 40	0.19 ± 0.07	0.44 ± 0.05	5.90 ± 0.89	6.53 ± 0.96				
	40 ~ 60	0.19 ± 0.12	0.54 ± 0.31	3.92 ± 1.94	4.65 ± 2.36				
	60 ~ 80	0.12 ± 0.05	0.24 ± 0.04	0.15 ± 0.04	0.51 ± 0.07				
	80 ~ 100	0.03 ± 0.03	0.21 ± 0.13	1.69 ± 1.66	1.93 ± 1.82				
	Subtotal	0.72 ± 0.28	1.65 ± 0.31	21.53 ± 5.74	23.90 ± 6.25				

* 3 个重复平均值 ± 标准误差 Mean ± standard error(SE) of 3 separate experiments

土壤水分含量在表层(0~30 cm)波动较大(图 2),雨季大多保持在 30%左右,而旱季土壤水分有时小于 25%。比较而言,树木区在 100 cm 以下的土壤水分含量不同季节反差较大,特别表现在季节性干早期(6月下旬~9月末)一直持续保持较低的含水量;说明此时有限的降雨只能补充表层土壤水分,即使到达深层,也被树木根系迅速利用。图 2 可见,即使在表层土壤干旱的 7~8 月份,花生单作和复合处理表层土壤水分含量差异较小;说明南酸枣主要利用下层土壤水分缓解干旱胁迫,与花生对表层水分的竞争不明显。而间作南酸枣由于其具有更大的生长量,消耗更多的土壤水分,其土壤水分含量也低于单作南酸枣。特别是 50~100 cm 土层土壤水分含量 T2P、T1P 处理明显低于 P 处理,充分说明复合系统主要加大了对这个层次土壤水分的利用,这与南酸枣树的根系状况相一致。且由于南酸枣分布在这个层次的根系大树较小树为多,故南酸枣大树处理土壤水分含量更低;至于深层两者之间的土壤水分含量变化高度一致,说明由于复合利用形成的深层(100~200 cm)用水极为有限。同样,图 3 进一步表明,T2P 处理中,随着离树距离的增大,土壤水分含量先增大后减小,说明树木的根系加大了对水平 1 m 范围内水分的利用,可知南酸枣根系吸水范围大致为土深 1 m,水平 1 m 的区域。

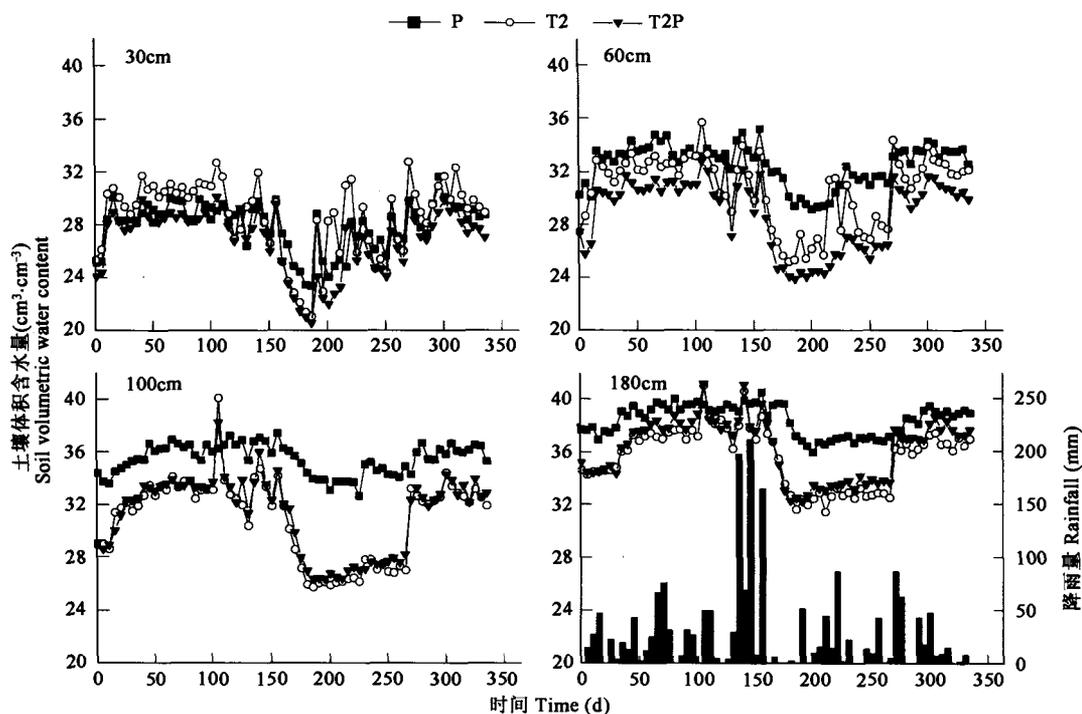


图 2 2000 年 P、T2 和 T2P 处理树种植带土壤水分含量时空变化

Fig.2 Variation of soil volumetric water content at 0m distance from tree in P, T2 and T2P treatment in 2000

2.2 竞争机理

树木和农作物根系以土壤为介质存在着水分和养分的地下竞争界面^[15]。根系分析表明,在 40 cm 以上土层中花生和林木的生态位宽度都比较大,从而形成了农作物与树木间对水分、养分的竞争根源;但是由于南酸枣在林下 40~100 cm 仍有较大的生态位宽度,这不仅使南酸枣在竞争中形成优势,而且在一定程度上也缓解了其与花生的种间竞争关系。比较 P 与 T2P 处理(图 2),即使在旱季,30 cm 土层土壤水分含量没有显著差异,其差异主要表现在 50 cm 以下土层,这表明花生根浅,无法利用深层水分,而间作南酸枣主要通过吸收深层土壤水分,释放到浅层土壤中被浅根作物花生吸收利用。可见物种间根系作用存在互利关系。土壤水分时空变化表明,间作南酸枣加大了对 50~100 cm 土层土壤水分的利用,这与南酸枣树的根系生态位是一致的。红壤的通透库容较高,决定了其具有较高的透水性,即使在旱季以后,土壤深层尚贮存不少有效水,这为农林间作的水分协同利用提供了可能。如果选择深根系树木或根系生态相似性较小的物种复合,则使这种可能具

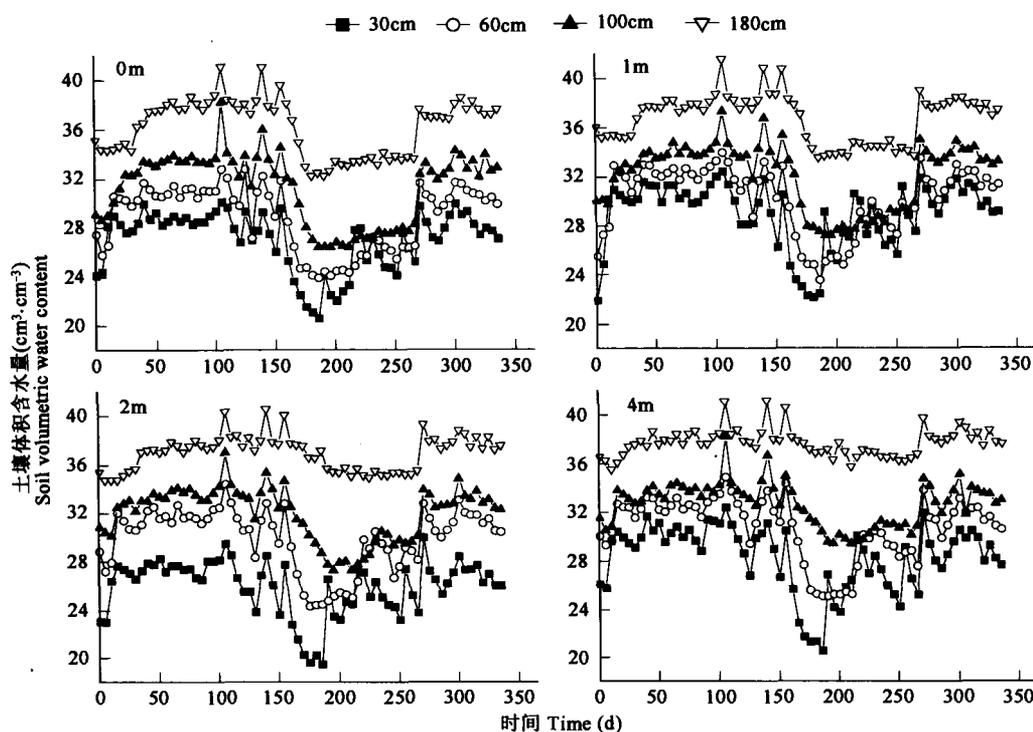


图3 2000年T2P处理中土壤水分含量在离树0,1,2,4 m的变化

Fig.3 Variation of soil volumetric water content at 0,1,2,4 m distance from tree in T2P treatment in 2000

有较大的可行性。

当然,植物生长所需的水分必须由根系从土壤中吸收而来,这就必然决定了间作树木与农作物的水分竞争关系。图2表明。土壤水分含量开始剧烈的变化发生在6月初,即旱季伊始而花生开花结荚阶段(花针期);在旱季中期,土壤水分含量在7月上旬达到了最低值 $0.21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (接近于土壤胁迫水分含量),此时正值花生结荚饱果阶段(结荚期)。由此可见,4~6月份表层土壤水分含量均在30%左右,不会对花生的生长造成严重影响;而表层土壤水分含量6月上旬开始降低,将直接影响花生生长。但此时间作与花生单作土壤水分含量并没有明显区别,说明花生区表层土壤水分状况的降低是由于土壤、气候与生物因素综合作用的结果,而非由树木的引入直接影响。可见农林间作对土壤水分的影响不是促进南酸枣生长、降低花生产量的主要原因。

间作南酸枣竞争利用施于毗邻花生的氮肥,导致花生减产,表明养分竞争对间作花生产量有一定影响。然而,在南酸枣小树对于模拟淋溶至35 cm和55 cm土层的氮素利用率仅分别为2.29%、0.87%的条件下,而间作花生产量仍然分别比单作降低了52.4%、51.2%,表明养分竞争不是花生产量下降的主要因素(表2)。花生氮素利用率因复合南酸枣竞争吸收而下降,施肥愈深、降幅愈大;但两者吸收总氮量增加,且施肥愈深、增量愈大。南酸枣根系以>10 mm骨骼根为主,比重高达82.7%~90.1%,直接吸收养分的细根上下分布较匀,有利于吸收淋溶至土壤深层(60 cm)的养分,提高养分总利用率^[16]。当然,间作系统中南酸枣吸收了施于间作花生的肥料,促进其生长,这提示人们必须加强间作树木的施肥管理措施,只要管理得当,则树木引入所形成的养分负面效应不但可以降低甚至避免,而且可以提高养分利用率。

树木的生态学特性及树木的结构配制是地上界面以空气为介质作用机制的重要因子^[18]。复合大树株高、胸径和树冠均比小树大,同花生竞争光、热、水资源的能力更强,这是大树对胁地范围内农作物影响程度大的主要原因。当地夏季花生生长盛期正午太阳高度角约65~70°,影长约为树高的0.5倍,早晚时刻太阳高度角多<25°,影长为树高的1倍。由于太阳方位与高度角的变化,其遮荫范围各不相同;对行间花生而言,树的

行向、密度、树高和冠幅直接影响其光照强度和交互遮荫时间的长短。统计结果表明复合花生产量、生物量与相对光合有效辐射值呈显著正相关(R 分别为0.836**、0.691**, n 为420),说明光能竞争是导致间作花生产量下降的主要原因。

3 讨论

南酸枣根系多集中分布于树下1~2 m范围内,故南酸枣与花生的地下水、肥竞争主要在树冠两侧2~3行花生处,大树两侧3~7行、小树两侧3~5行花生产量与生物量下降主要是光能不足所致。南酸枣与花生复合系统物种间水肥光3因子交互作用,农林复合系统通过其对区域微气象环境的改变、土壤理化性质的影响及树木引入对深层土壤水分养分的利用,改变了植物资源利用体系,且这种影响随着树龄的增大而加强。就土壤水分而言,其对作物的影响不仅取决于干旱的严重程度、作物的耐旱性能及作物对水分的利用程度,也取决于物种间对养分、光能等其它资源的竞争并引起的变化^[17]。根据生态位理论,生态位重叠是对资源利用性竞争的一个必要条件,但重叠并不一定必然导致竞争,只有在资源供应不足时才导致竞争。南酸枣树有0.3~0.5 cm粗的侧根5~18条伸入花生垅下20 cm土层与花生根交叉分布,物种间表层根系存在生态位重叠;但是从水分动态变化来看并不存在明显竞争,只是在季节性干旱发生时土壤剖面水分含量急剧下降,水分匮乏,物种间存在一定水分竞争。然而同花生单作比起来,则复合相对缓解了花生的旱象。本试验观测到南酸枣蒸腾的夜间茎流现象及复合南酸枣加大对50~100 cm土壤水分利用的状况,或许可以说明与南酸枣复合的旱作花生在7、8月份旱季会利用由南酸枣“提水作用”^[18]引起的土壤剖面中再分配的水分及所增加的土壤养分有效性,缓冲季节性干旱期水分胁迫造成的影响,这也是该区提倡的南酸枣花生复合系统在水分养分协同利用上具有可操作性的一个重要方面。

作物产量、生物量与N素利用率变化相一致,其N的利用率又与其吸收养分的根量、根系分布特征有关;反之,养分的利用也会促进根系的生长,提高水分利用的程度。多数试验表明,豆科树种与间作农作物之间氮素竞争作用较弱,可能是豆科作物能够通过自身的生物固氮作用满足其氮素需求^[19]。本试验中南酸枣对表层土壤氮素的竞争主要归因于其可利用氮源的限制。南酸枣是一种非固氮速生树种,在贫瘠红壤,且本身没有施肥的情况下,可利用的氮源非常有限。同时,花生区的耕作、施肥促进了南酸枣根系在土壤表层的扩展,加剧了养分竞争。因此,在贫瘠红壤中农林间作可优先选择固氮树种,通过对间作树木直接施肥,或控制树木根系在土壤表层的分布,促进其向深层次发展,减少其与间作农作物的养分竞争,而发挥其深层根系的安全网作用,减少养分淋失^[19]。同样,农林间作引起光能分布也会影响养分利用、水分状况及生产力;且光能的竞争对产量的影响或许被养分、水分竞争影响所减弱或加强。许多研究表明,可利用光的多少是作物生长最重要的限制因素。Willey等^[20]在印度的研究表明,花生御谷(*Pennisetum glaucum*)间作下阴影的影响比地下的竞争更为重要。剪枝在一定程度上能增加间作花生的光合有效辐射,提高花生产量,但仍然仅相当于单作花生的58.1%~68.1%。裴保华等^[21]研究表明,通过合理密度和配置设计,修剪和间伐管理,保证间作的平均透光率在50%以上,则可以防治农作物产量和品质的降低。因此,在与南酸枣类似的乔木或成年果树复合中,应优先选择种植耐荫农作物、茶叶或中药材,而非花生类喜光作物;在以花生等喜光农作物为主要生产目标时,应优先选择低矮灌木替代乔木,以减少光能竞争。本试验与花生复合种植的南酸枣树呈东西行向(行距6 m,株距2 m),树行间复合种植花生全日交互遮荫,光照大幅减弱,如采用南北向栽植,花生约距树0.5~1倍树高种植,午间遮荫花生受影响面积则可减小。

综上所述,物种间水肥光3个竞争影响因子中,水分竞争不是抑制花生生长的主要障碍因子;养分竞争对花生有一定影响,但不是花生产量下降的最重要因素;光对花生产量、生物量的影响最为明显。由此可见,在花生产量、生物量受复合南酸枣竞争水肥光影响因子中,以光最大、养分其次、水分最小。因此,为了减少地下界面树木与农作物根系的竞争强度,充分利用土壤不同层次上的资源,就必须选择根系分布较深、旺盛生长期与农作物生长期重叠较小或不重叠的树种。至于地上界面,要加强田间管理、增加对乔木地上部分的定期修剪,选择耐荫农作物或低矮灌木替代乔木,调整树木行向和间距等以减少光能竞争。有关农林复合系统的优

化及模式评价方面,研究人员利用层次分析法、模糊综合评判等方法已做了大量的工作^[22]。本研究虽然在生态效益分析与评价方面取得了一些进展,但在社会经济生态效益分析方面由于资料的限制还很薄弱,需要进一步的分析与实践,以便从生态、经济、社会方面对复合模式加以优化,这包括树种及树龄的选择,复合系统时空配置等。从生态效益与经济效益来看,南酸枣一来经济价值不高,二来同花生复合其生态优势较强,离树较远处花生受光照遮阴对产量影响很大,增大间距则同样使总产量下降;在早年旱季时水分胁迫影响也较大,故花生南酸枣间作不是一种优化农林间作模式。从树种的选择上,建议推广效益好的经济林木如杨梅、柑橘等增加农民收入;或者是杜仲、板栗、桃等在提高收入的同时还可利用其枯枝落叶物量大的特点提高土壤肥力;复合物种应该由喜光旱作逐步转向耐荫药用植物如“绞股兰”、“射干”等。

4 结论

(1) 南酸枣-花生复合系统能够利用土壤 50~100 cm 土层的水分及淋失到 60 cm 深处的氮素,但在充分利用水肥光资源的过程中存在着竞争,并导致花生减产。这种竞争取决于复合组分类型与时空配置。在间种喜光作物花生时,光的竞争是主要的,养分、水分竞争是次要的。

(2) 多年试验表明,该区建立花生-南酸枣农林复合生态系统具有一定的生态价值,但由于南酸枣应用不广,复合后花生减产明显,总体经济效益相对较低,故这种模式不宜大力推广。对此应因地制宜选择有经济生态效益的林果与农作物复合,并在栽培过程中巧用物种间资源利用的时空差异,辅之以合理的管理措施,扬长避短。

References:

- [1] Xie J X. Survey in agroforestry. Transaction of Beijing forestry university, 1989, 10 (1): 104 ~ 108.
- [2] Zhang B, Zhang T L. Hydraulic ecological characteristics of alley cropping systems and its productivity in low hilly red soil region. Chinese Journal of Ecology, 1997, 16 (4): 1 ~ 5.
- [3] Zhang B, Zhang T L. Cause of seasonal drought formation and strategy of the eastern hills in southern China. Acta Ecologica Sinica, 1995, 15 (4): 413 ~ 419.
- [4] Li W H, Lai Sh D, Luo Ch J, et al. Agriculture management in China. Beijing: Science Press, 1994. 1 ~ 8.
- [5] Zhang J S, Meng P, Yin Ch J, et al. Summary on the Water Ecological Characteristics of Agroforestry System. World Forestry Research, 2003, 16 (1): 10 ~ 14.
- [6] Li B, Chen J K, Watkinson A R. A literature review on plant competition. Chinese Bulletin of Botany, 1998, 15 (4): 18 ~ 29.
- [7] Szott L T, Fernandes E C M, Sanchez P A, et al. Soil plant interactions in agroforestry systems. Forest Ecology and Management, 1991, 45: 127 ~ 152.
- [8] Chen W, Xue L. Root interactions: competition and facilitation. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1243 ~ 1251.
- [9] Huang X L, Ding R X. Microclimate characteristics of tea-arbor complex garden in subtropical hilly area. Acta Ecologica Sinica, 1991, 11(1): 7 ~ 12.
- [10] Ye Ch, Xiong G G, Huang Q H, et al. Study on intercropping of Paulownia and Tea in low hilly red soil. Acta Agriculture Jiangxi, 2001, 13 (1): 1 ~ 8.
- [11] Akinnifesi F K, Kang, B T, Sangina N, et al. Nitrogen use efficiency and N-competition between *leucaena* hedgerows and maize in an alley cropping system. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, 47: 71 ~ 80.
- [12] Wang X X, Zhang T L, He Y Q, et al. N recovery in *Choerospondias axillaris* and Peanut (*Arachis hypogaea*) alley cropping systems on Udic Ferrosol in subtropical China. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40 (4): 588 ~ 592.
- [13] Wang X X, Zhang B, Wang M Zh, et al. Competitiveness for light and crop productivity in Agro-forestry systems in hilly red soil region — a case study of *Choerospondias axillaris* intercropping with *Arachis hypogaea*. Chinese J. Ecology, 2002, 21 (4): 1 ~ 5, 11.
- [14] Feng Z W, Wang X K, Wu G. Biomass and productivity of forest system in China. Beijing, Science Press, 1993. 13 ~ 14.
- [15] Wu G, Li J, Deng H B. Primary research on interface ecology in agroforestry ecosystems. China J Appl Ecol, 2000, 11 (3): 459 ~ 460.
- [16] Zhu Q K, Zhu J Z. Study on Niche of agroforestry systems in the loess Plateau. Science of Soil and Water Conservation, 2003, 1 (1): 49 ~ 52.
- [17] Ong C K, Wilson J, Deans, J D, et al. Tree-crop interactions; manipulation of water use and root function. Agricultural Water Management, 2002, 53: 171 ~ 186.
- [18] Caldwell M M, Richards J H. Hydraulic lift: Water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake by deep roots. Oecologia, 1989, 79: 1 ~ 5.
- [19] Rowe E C, Hairiah K, Giller K E, et al. Testing the safety-net role of hedgerow tree roots by ¹⁵N placement different soil depths. Agroforestry System, 1999, 43: 81 ~ 93.
- [20] Willey R W, Reddy M S. A field technique for separating above and below-ground interactions in intercropping: an experiment with pearl millet/groundnut.

Exper. Agric, 1981, 17: 257 ~ 264.

- [21] Pei B H, Yuan Y X, Wang Y. The effect of simulation tree shading to wheat growth and output. Journal of Agriculture University of Hebei, 1998, 21 (1): 1 ~ 5.
- [22] Zhang J L, Liu L D. Intergrated evaluation of the effects of agroforestry ecosystem on the river beach. Acta Ecologica Sinica, 1995, 15(4): 442 ~ 449.

参考文献:

- [1] 谢京湘. 农林复合生态系统研究概况. 北京林业大学学报, 1989, 10 (1): 104 ~ 108.
- [2] 张斌, 张桃林. 低丘红壤区农林间作系统的水分生态特征及生产力. 生态学杂志, 1997, 16 (4): 1 ~ 5.
- [3] 张斌, 张桃林. 南方东部丘陵区季节性干旱成因及其对策研究. 生态学报, 1995, 15 (4): 413 ~ 419.
- [4] 李文华, 赖世登, 罗菊春, 等. 中国农林复合经营. 北京: 科学出版社, 1994. 1 ~ 8.
- [5] 张劲松, 孟平, 尹昌君, 等. 农林复合系统的水分生态特征研究述评. 世界林业研究, 2003, 16 (1): 10 ~ 14.
- [6] 李博, 陈家宽, 沃金森 A R. 植物竞争研究进展. 植物学通报, 1998, 15 (4): 18 ~ 29.
- [8] 陈伟, 薛立. 根系间的相互作用——竞争与互利. 生态学报, 24(6), 2004, 1243 ~ 1251.
- [9] 黄晓澜, 丁瑞兴. 亚热带丘陵区茶林复合系统小气候特征的研究. 生态学报, 1991, 11(1): 7 ~ 12.
- [10] 叶川, 熊国根, 黄庆海, 等. 低丘红壤泡桐-茶树复合种植模式的研究. 江西农业学报, 2001, 13(1): 1 ~ 8.
- [12] 王兴祥, 张桃林, 何园球, 等. 花生-南酸枣间作系统氮素利用研究. 土壤学报, 2003, 40(4), 588 ~ 592.
- [13] 王兴祥, 张斌, 王明珠, 等. 低丘红壤复合农林系统光能竞争与生产力——以花生南酸枣间作为例. 生态学杂志, 2002, 12 (4): 1 ~ 5, 11.
- [14] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 北京: 科学出版社, 1999. 13 ~ 14.
- [15] 吴刚, 李静, 邓红兵. 农林生态系统界面生态学初探. 应用生态学报, 2000, 11 (3): 459 ~ 460.
- [16] 朱清科, 朱金兆. 黄土塬面农林复合系统的生态位特征. 中国水土保持科学, 2003, 1 (1): 49 ~ 52.
- [21] 裴保华, 袁玉欣, 王颖. 模拟林木遮光对小麦生育和产量的影响. 河北农业大学学报, 1998, 21 (1): 1 ~ 5.
- [22] 张家来, 刘立德. 江滩农林复合生态系统综合效益的评价. 生态学报, 1995, 15(4): 442 ~ 449.