

冯渊圆,徐筱芃,陆海鹰,等. 苏北沿海不同杨树-农作物生态系统下的土壤质量与作物生长生理动态变化[J]. 江苏农业科学,2021,49(17):193-201.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.17.035

# 苏北沿海不同杨树-农作物生态系统下的土壤质量与作物生长生理动态变化

冯渊圆<sup>1,2,3</sup>, 徐筱芃<sup>1,3</sup>, 陆海鹰<sup>2</sup>, 胡海波<sup>1,3</sup>, 邵宏波<sup>2</sup>

(1. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏南京 210037; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/ 农业农村部长江下游农业环境重点实验室, 江苏南京 210014; 3. 江苏省水土保持与生态修复实验室, 江苏南京 210037)

**摘要:**苏北沿海地区土地资源丰富,而杨树-农作物(简称杨-农)生态系统是一种高效的土地经营方式。为了探究沿海杨树-农作物生态系统下土壤质量以及农作物生长生理的动态变化,在江苏省东台市新曹农场滨海盐土条件下设置杨树纯林(CY)、杨树-花生(YH)、杨树-大豆(YD)、杨树-甘薯(YG)4种生态系统,研究各生态系统春、夏、秋3个季节的土壤理化性质,秋季不同生态系统的林地环境因子、林木生长性状、作物光合特性指标等,从而为苏北沿海地区杨-农生态系统的可持续发展提供系统科学的理论基础。结果表明,杨-农生态系统土壤含水量是杨树纯林的1.08~1.17倍,可使土壤有机质含量提高5.25%~21.06%;在垂直剖面上,杨-农生态系统对0~10cm土层的养分含量影响较大;土壤理化性质之间存在不同程度的相关性,其中土壤容重与pH值呈正相关,与其他指标呈负相关,土壤有机质含量与全氮、速效磷、速效钾含量都表现出极显著相关性。不同杨-农生态系统中林木生长状况各不相同,其中杨树纯林生态系统的林木成活率比杨-农生态系统高5~10个百分点。杨树纯林生态系统下的光合有效辐射比杨-农生态系统高14.54%~33.59%;各生态系统下的大气CO<sub>2</sub>浓度的日变化差异不大,而气温和相对湿度的变化差异显著( $P < 0.05$ )。在各生态系统下,农作物胞间CO<sub>2</sub>浓度与气孔导度的日变化呈相反的趋势,蒸腾速率日变化曲线和气孔导度相似。

**关键词:**苏北沿海地区;杨树-农作物生态系统;土壤理化性质;树高;胸径;光合特性;环境因子  
**中图分类号:**S727.24;S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)17-0193-09

改善苏北沿海生态环境,土壤和植物是关键。土壤质量是衡量土壤环境状况的重要表现<sup>[1]</sup>,而光合作用是影响植物生长发育的重要生理过程<sup>[2]</sup>。选择适生植被、组建复合生态系统,对环境保护<sup>[3]</sup>、土壤质量提升<sup>[4]</sup>和植株生长发育具有重要意义。

杨树(*Pterocarya stenoptera*)是世界上分布最广的树种,其适应性极强。近年来,苏北农林生产中

大量引种培育杨树<sup>[5]</sup>。现代林下经济迅速发展阶段,典型林农生态系统作为提高效益的可行土地利用选择正在被广泛推广<sup>[6]</sup>。杨树-农作物(简称杨-农)生态系统根据生态经济学原理和方法,建立多个生物种群共存的复合生态系统,空间上要求多层次,时间上要求多序列。科学开展杨-农生态系统,不仅可以有效改良土壤,提高土地利用效率,还能增加生物多样性<sup>[7-8]</sup>,促进地上植被的生长发育<sup>[9]</sup>。关于苏北沿海地区土壤基础数据和改良方面,前人已经进行了大量研究<sup>[10-14]</sup>,但对苏北沿海杨-农复合生态系统下的土壤和作物研究较少。因此,本研究在江苏省东台市新曹农场滨海盐土条件下设置杨树纯林(CY)、杨树-花生(YH)、杨树-大豆(YD)、杨树-甘薯(YG)4种生态系统,研究不同生态系统春、夏、秋3个季节的土壤理化性质,秋季不同生态系统的林地环境因子、林木生长性状、农作物生理生态特性,从而为苏北沿海地区杨-农生态系统的可持续发展提供系统科学的理论基础。

收稿日期:2019-10-23

基金项目:江苏省优秀青年基金(编号:BK20200057);国家林业和草原局长三角森林生态系统定位研究项目(编号:20119132158);江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(17)1004-2];江苏省高等学校协同创新计划A项目;江苏省高等学校优先发展学术计划;江苏省农业科学院优秀科学家计划。

作者简介:冯渊圆(1992—),女,江苏无锡人,硕士,研究实习员,主要从事水土保持与生态修复、农林资源高效利用研究。E-mail: feng.yuanyuan@hotmail.com。

通信作者:胡海波,博士,教授,主要从事水土保持与林业生态工程研究,E-mail:huhb2000@aliyun.com;邵宏波,博士,研究员,主要从事植物逆境生物学和土壤污染生物修复研究,E-mail:shaohongbochu@126.com。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验地位于江苏省东台市新曹农场(32°56′~32°58′N、120°13′~120°24′E),地处滨海平原区,为亚热带与暖湿带的过渡地带,东临黄海,属于湿润的季风气候区,雨量充沛。多年平均气温 14.1℃,无霜期 209 d,常年降水量 1 068 mm。土壤多为滨海盐土,表土含盐量为 0.20%~0.25%,pH 值在 8.0~9.5 之间。

试验林为杨-农生态系统,滨海盐土条件下杨树平均树高为 5.73 m,平均胸径为 29.85 mm,为 3 年生幼林,株行距为 6 m×5 m。试验林于 2016 年 3 月中旬种植,栽植时浇透定根水,2017 年 9 月起测定杨树和 3 种农作物(花生、大豆和甘薯)的光合特性指标及其环境因子。林分基本特征参数见表 1。

表 1 滨海盐土条件下杨树林不同林分基本特征

株行距 (m×m)	平均树高 (m)	平均胸径 (mm)	林下农作物
6×5	5.83	30.21	无
6×5	5.72	28.77	花生
6×5	5.86	29.77	大豆
6×5	5.63	30.66	甘薯

### 1.2 测定方法

1.2.1 土壤理化性质的测定 为使研究具有代表性,春、夏、秋 3 个季节对应选择 3 月、6 月、9 月的中旬,选取不同生态系统下西南角、中心点、东北角的 3 块试验地,每个试验地面积为 1 m<sup>2</sup>,挖取 3 个土壤剖面,按 0~10、10~20、20~40 cm 分层取样,环刀土用于测定土壤含水量、容重和孔隙度,每层重复 3 次。试验地内采用梅花布点法取土,土样混合均匀后采用四分法取部分样品进行室内风干过筛,其中 20 目网筛土样用于测定 pH 值和速效磷含量,100 目网筛土样用于测定全氮、有机质含量等土壤化学性质。对土壤理化性质的测定主要依据《森林土壤分析方法》《土壤农化分析》中的相关说明进行。其中,土壤容重、孔隙度的测定采用环刀法;土壤含水量的测定采用烘干法;土壤 pH 值的测定采用电位计法(土水质量比为 1.0:2.5);土壤有机质含量的测定采用重铬酸钾外加热法;土壤全氮含量的测定先用浓硫酸消煮后采用 FIAstar 5000 流动注射仪分析法;土壤速效磷含量的测定采用 0.5 mol/L 碳酸氧钠浸提法;土壤速效钾含量的测定采用双酸浸

提-火焰光度法。

1.2.2 杨树生长指标的测定 用精度为 1 cm 的卷尺测定杨树的树高,用精度为 0.02 mm 的游标卡尺测定杨树的胸径,各测 30 株,计算树高和胸径的增长率:增长率=(测定值-初始值)/初始值,其中测定值为最终采样时杨树的树高或胸径,初始值为杨树栽植时的树高或胸径。此外,于 2017 年 10 月调查杨树的成活率。

1.2.3 各生态系统下农作物光合特性及其环境因子的测定 2017 年 9—10 月选择晴朗无云的天气,利用 Li-6400 便携式光合作用测量系统(LI-COR, USA)对各生态系统下农作物叶片的光合特性指标及其环境因子进行测定,每周测定 1 次,在测定日的 08:00—18:00 每隔 2 h 测定 1 次,每次选取 3 株健康生长的农作物,每株选取相同部位且没有病斑的 3 组叶片进行测定,每组 3 张叶片,重复测定 3 次,取平均值进行分析。其中,环境因子参数包括光合有效辐射(PAR)、气温、相对湿度和大气 CO<sub>2</sub> 浓度,光合特性指标主要包括农作物的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ )。

### 1.3 数据统计和分析

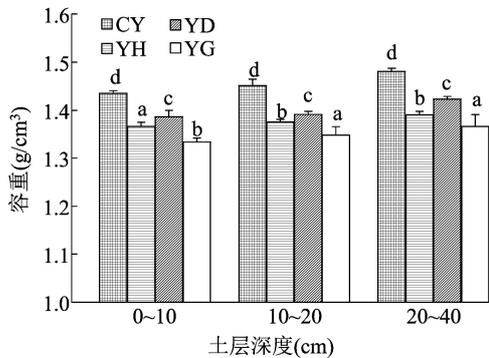
使用 Microsoft Excel 2013 软件进行数据处理和表格制作等,使用 Sigmaplot 12.0 和 GraphPad Prism 8.0 绘制图片,采用 SPSS 22.0 软件进行相关数据的统计与分析等。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同杨-农生态系统下土壤物理性质的影响

2.1.1 不同杨-农生态系统下的土壤容重 由图 1 可知,土壤容重随着土层深度的增加总体呈现增大趋势,同一土层土壤容重表现为杨树纯林(CY) > 杨树-大豆(YD) > 杨树-花生(YH) > 杨树-甘薯(YG)。在脱盐土条件下,杨树纯林的土壤容重变化范围为 1.436~1.493 g/cm<sup>3</sup>。

2.1.2 不同杨-农生态系统下土壤含水量 由图 2 可知,土壤含水量随着土层加深逐渐提高。在各个土层中,不同生态系统土壤含水量总体存在显著差异。杨树-大豆(YD)土壤含水量在各个土层均保持最高水平;杨树-花生(YH)土壤含水量在 0~10 cm 土层略高于杨树-甘薯(YG),在 10~40 cm 土层相反,这可能与作物根系位置有关。土壤平均含水量表现为杨树-大豆(YD, 20.925%) > 杨树-花生



不同小写字母表示相同季节相同土层不同生态系统下土壤容重差异达显著水平( $P < 0.05$ )。图 2 至图 8 同

图 1 不同生态系统下的土壤容重

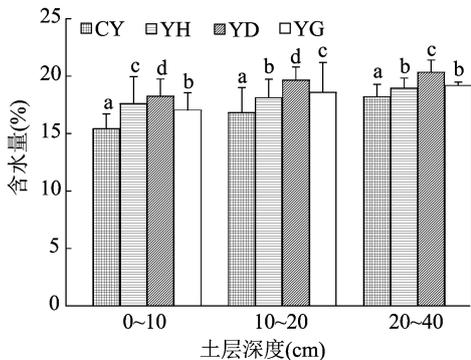


图 2 不同生态系统下土壤含水量

(YH, 19.901%) > 杨树 - 甘薯 (YG, 19.274%) > 杨树纯林 (CY, 17.876%), 杨 - 农生态系统土壤含水量是杨树纯林的 1.08 ~ 1.17 倍。

2.1.3 不同杨 - 农生态系统下土壤孔隙度 由图 3 可知, 不同生态系统下土壤孔隙度总体趋势与土

壤容重相反, 随着土层深度的增加逐渐减小, 0 ~ 40 cm 土层各生态系统下土壤孔隙度差异明显, 杨 - 农生态系统土壤孔隙度明显高于杨树纯林。3 种生态系统的平均土壤孔隙度分别比对照杨树纯林提高 3.94%、2.67%、7.03%。

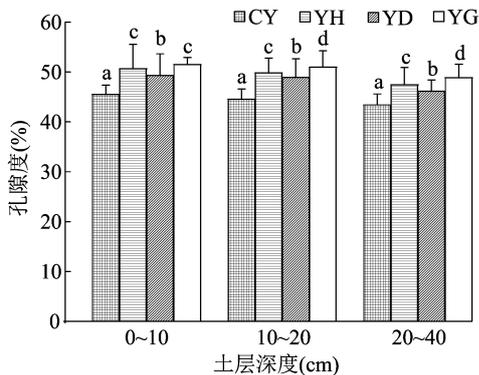
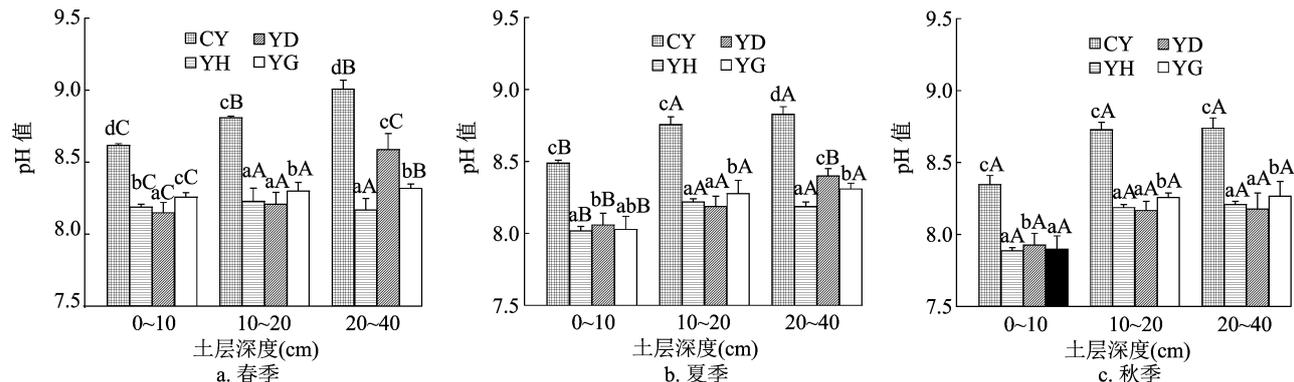


图 3 不同生态系统下土壤孔隙度

## 2.2 不同杨 - 农生态系统下土壤化学性质的变化

2.2.1 土壤 pH 值动态变化 由图 4 可知, 春季杨树纯林土壤 pH 值总体趋势是随着土层深度的增加呈线性增加, 0 ~ 20 cm 土层 3 种杨 - 农生态系统土壤 pH 值变化不明显。夏季和秋季杨树纯林土壤 pH 值随着土层深度增加而增加的速度减缓, 0 ~ 40 cm 土层中杨树 - 花生 (YH) 和杨树 - 甘薯 (YG) 土壤 pH 值变化趋势相近。20 ~ 40 cm 土层中杨树 - 大豆 (YD) 土壤 pH 值较 0 ~ 20 cm 土层在春季增加 0.38, 夏季增加 0.21, 秋季增加 0.10。杨树纯林土壤 pH 值明显高于杨 - 农生态系统。



不同大写字母表示相同生态系统下相同土层不同季节之间的土壤 pH 值差异达显著水平( $P < 0.05$ )。图 5 至图 8 同

图 4 不同生态系统下土壤 pH 值

2.2.2 土壤有机质含量的动态变化 由图 5 可知, 在相同土层中, 随着季节的变化, 土壤有机质含量呈增加趋势; 在相同季节, 随着土层深度的增加, 土壤有机质含量逐渐降低。在春季, 杨 - 农生态系统土壤有机质含量均大于杨树纯林, 各生态系统土壤有机质含量表现为杨树 - 花生 (YH) > 杨树 - 大豆

(YD) > 杨树 - 甘薯 (YG) > 杨树纯林 (CY)。在夏季, 杨树 - 花生 (YH) 土壤有机质含量偏高, 0 ~ 10 cm 土层杨树 - 大豆 (YD) 和杨树 - 甘薯 (YG) 土壤有机质含量相近, 10 ~ 20 cm 土层与 20 ~ 40 cm 土层杨树 - 甘薯 (YG) 土壤有机质含量差异不大。在秋季, 0 ~ 40 cm 土层杨树 - 大豆 (YD) 和杨树 -

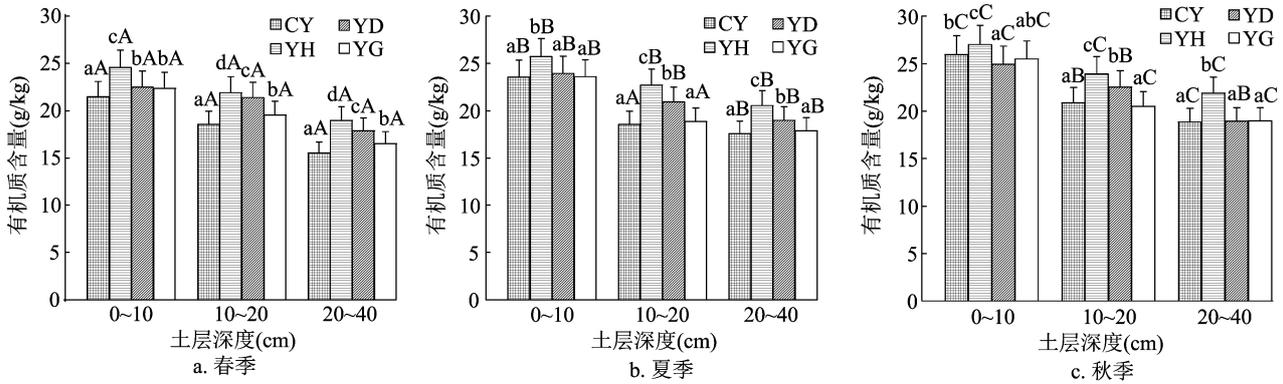


图5 不同生态系统下土壤有机质含量

甘薯(YG)土壤有机质含量相近,杨树-花生(YH)土壤有机质含量依然最高。

2.2.3 土壤全氮含量的动态变化 由图6可知,各杨-农生态系统土壤全氮含量随土层深度的增加而降低。春、夏、秋3个季节里杨-农生态系统土壤全氮含量明显高于杨树纯林。在春季,0~20 cm土层中全氮含量最高的是杨树-花生(YH),20~40 cm土层中杨树-大豆(YD)的土壤全氮含量最高。在夏季,0~10 cm土层中杨-农生态系统下土壤全氮含量达到杨树纯林(CY)的1.28~1.38倍,10~20 cm土层中杨树-大豆(YD)和杨树-甘薯

(YG)的土壤全氮含量接近,20~40 cm土层中土壤全氮含量表现为杨树-大豆(YD,0.580 g/kg) > 杨树-甘薯(YG,0.525 g/kg) > 杨树-花生(YH,0.480 g/kg) > 杨树纯林(CY,0.418 g/kg)。在秋季,0~10 cm土层中杨树-花生(YH)、杨树-大豆(YD)、杨树-甘薯(YG)的土壤全氮含量分别是杨树纯林的1.38、1.29、1.32倍,10~20 cm土层中杨树-花生(YH)的土壤全氮含量较其他生态系统偏高。杨-农生态系统下土壤全氮含量整体较高,主要是因为间作期间进行了人工施肥。

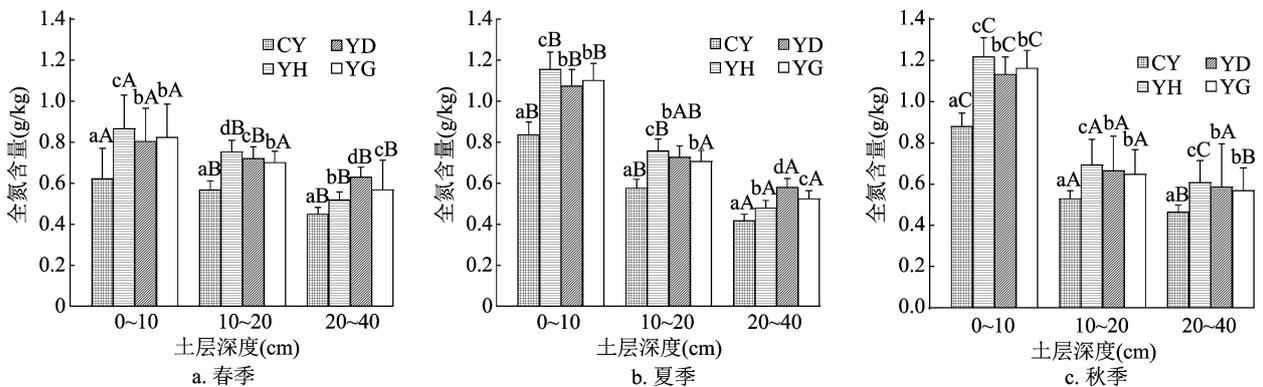


图6 不同生态系统下土壤全氮含量

2.2.4 土壤速效磷含量的动态变化 由图7可以看出,各种生态系统下的土壤速效磷含量在同一季节随着土层深度的增加逐渐降低,在0~10 cm土层中土壤速效磷含量随着季节的变化差异明显,10~40 cm土层各种生态系统土壤速效磷含量在春夏2季差异不显著,而在秋季显著减少。春季0~10 cm土层中3种杨-农生态系统的土壤速效磷含量分别达到杨树纯林的1.67、1.96、1.99倍,10~40 cm土层各杨-农生态系统土壤速效磷含量情况一致,表现为杨树-大豆(YD) > 杨树-甘薯(YG) > 杨树

-花生(YH) > 杨树纯林(CY)。在夏季,杨树-大豆(YD)土壤速效磷含量在0~40 cm土层中较高,最高达到22.86 mg/kg。秋季0~10 cm土层各种生态系统土壤速效磷含量分别是杨树纯林(CY)的1.71、1.97、2.16倍,10~20 cm土层间作土壤速效磷含量表现为杨树-花生(YH) > 杨树-甘薯(YG) > 杨树-大豆(YD),20~40 cm土层中杨树-大豆(YD)的土壤速效磷含量高于其他生态系统。

2.2.5 土壤速效钾动态变化 由图8可知,土壤速效钾含量随着土层深度的加深而逐渐降低,随着季

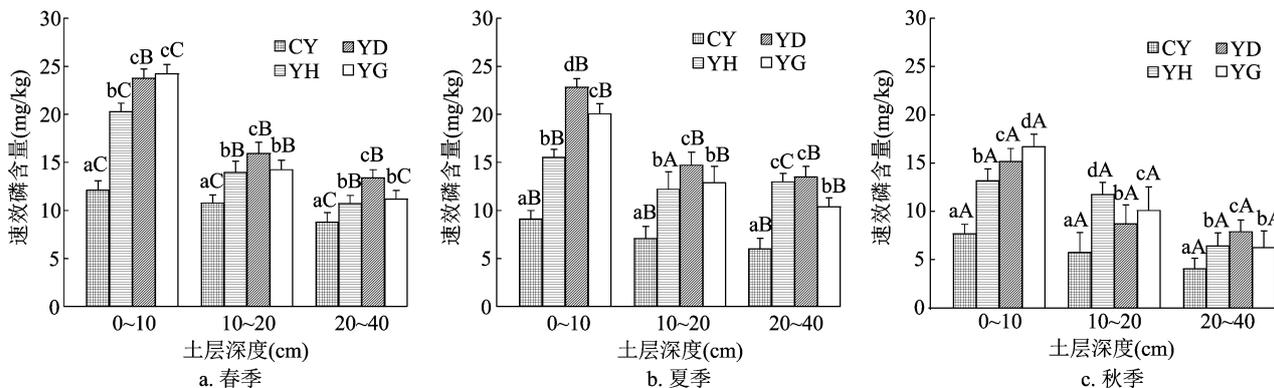


图7 不同生态系统下土壤速效磷含量

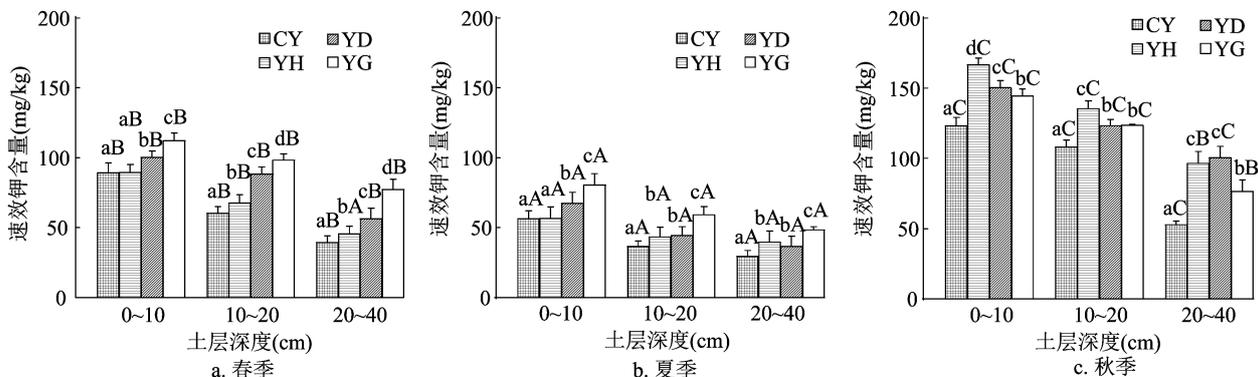


图8 不同生态系统下土壤速效钾含量

节的变化先下降后提高。春季各个土层土壤速效钾含量表现为杨树 - 甘薯 (YG) > 杨树 - 大豆 (YD) > 杨树 - 花生 (YH) > 杨树纯林 (CY); 夏季 0 ~ 10 cm 土层中杨树 - 花生 (YH) 的土壤速效钾含量和杨树纯林 (CY) 相近, 10 ~ 20 cm 杨树 - 花生 (YH) 和杨树 - 大豆 (YD) 的土壤速效钾含量相近, 20 ~ 40 cm 土层土壤速效钾含量表现为杨树 - 甘薯 (YG) > 杨树 - 花生 (YH) > 杨树 - 大豆 (YD) > 杨树纯林 (CY)。秋季 0 ~ 20 cm 土层杨树 - 花生

(YH) 的土壤速效钾含量相对较高, 表层土壤速效钾含量最高可达 166.88 mg/kg。

### 2.3 不同杨 - 农生态系统土壤理化性质相关性分析

由表 2 可以看出, 土壤容重与 pH 值呈正相关, 与其他指标呈负相关, 土壤有机质含量与全氮含量、速效磷含量、速效钾含量都表现出极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 表明土壤养分的释放主要来自于土壤有机质的分解。

表 2 土壤理化性质相关性分析

指标	相关系数							
	容重	含水量	孔隙度	pH 值	有机质含量	全氮含量	速效磷含量	速效钾含量
容重	1.000							
含水量	-0.145	1.000						
孔隙度	-0.974 **	0.123	1.000					
pH 值	0.796 **	-0.146	-0.830 **	1.000				
有机质含量	-0.373	-0.600	0.466	-0.619 *	1.000			
全氮含量	-0.519 *	-0.406 *	0.601 *	-0.790 **	0.877 **	1.000		
速效磷含量	-0.711 **	-0.175	0.795 **	-0.843 **	0.721 **	0.876 **	1.000	
速效钾含量	-0.585 *	-0.312	0.692 *	-0.750 **	0.854 **	0.840 **	0.858 **	1.000

注: \*\*, \* 分别表示在 0.01、0.05 水平 (双侧) 上显著相关。

## 2.4 不同杨-农生态系统林木生长状况

各生态系统中林木生长状况如表3所示,各杨-农生态系统中树高增长率差异不明显,但是呈现出一定的规律,即杨树纯林(CY) > 杨树-大豆(YD) > 杨树-花生(YH) > 杨树-甘薯(YG);相应地,各生态系统下的胸径增长率差异也不明显,依然表现为杨树纯林(CY) > 杨树-大豆(YD) > 杨树-花生(YH) > 杨树-甘薯(YG)。各杨-农生态系统中林木的成活率在50%~55%之间,杨树纯林的林木成活率达到60%,略高于杨-农生态系统,可见间作物对林木的成活存在一定的负面影响,其中杨树-大豆(YD)的负面影响最小,杨树-花生(YH)的负面影响次之,杨树-甘薯(YG)的负面影响相对最大。

表3 杨-农生态系统对于林木生长的影响

复合生态系统	树高		胸径		成活率(%)
	初始树高(m)	增长率	初始胸径(mm)	增长率	
杨树纯林(CY)	5.8	0.18 ± 0.01	30.21	0.80 ± 0.02	60
杨树-花生(YH)	5.7	0.14 ± 0.01	28.77	0.75 ± 0.02	52
杨树-大豆(YD)	5.8	0.16 ± 0.02	29.77	0.79 ± 0.01	55
杨树-甘薯(YG)	5.6	0.13 ± 0.02	30.66	0.64 ± 0.02	50

## 2.5 不同杨-农生态系统对环境因子的影响

### 2.5.1 不同杨-农生态系统对光合有效辐射的影响

由图9可知,光合有效辐射的日变化趋势总体一致,呈两低一高的单峰曲线变化。06:00光合有效辐射在0左右,之后逐渐升高,12:00出现峰值,之后开始下降,18:00降至223.42~334.95  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。光合有效辐射总体上表现为杨树纯林(CY) > 杨树-花生(YH) > 杨树-大豆(YD) > 杨树-甘薯(YG)。08:00—10:00,杨树纯林(CY)、杨树-花生(YH)、杨树-大豆(YD)、杨树-甘薯(YG)的光合有效辐射上升幅度分别达82.66%、83.40%、103.67%、130.50%;10:00—12:00,杨树-花生(YH)和杨树-大豆(YD)、杨树-甘薯(YG)光合有效辐射差异不明显。杨-农生态系统对光合有效辐射的影响大于杨树纯林。

### 2.5.2 不同杨-农生态系统对林地气温的影响

由图10可以看出,各生态系统气温日变化与光合有效辐射变化趋势类似,总体上均呈现为先升高后降低的趋势。06:00杨树纯林的气温稍低于杨-农生态系统,06:00—12:00林地内的气温随着时间的延长逐渐增高,在14:00达到最高值,之后逐渐降低。

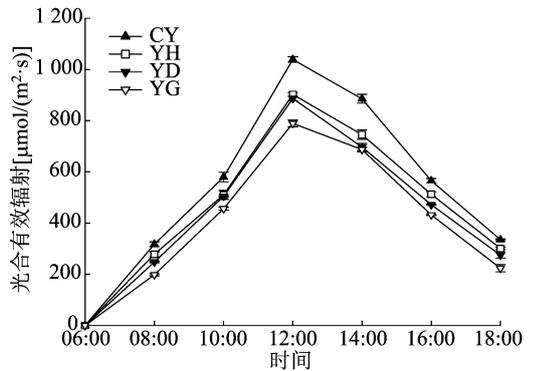


图9 光合有效辐射日变化

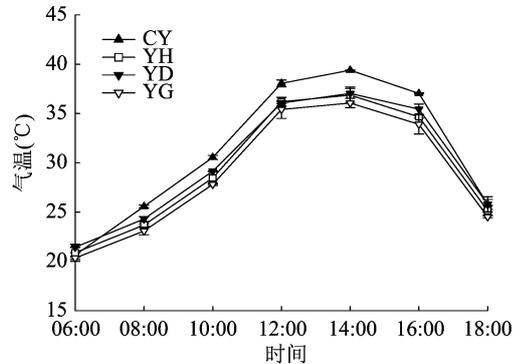


图10 林地气温日变化

气温日平均值表现为杨树纯林(CY, 31.00  $^{\circ}\text{C}$ ) > 杨树-大豆(YD, 29.89  $^{\circ}\text{C}$ ) > 杨树-花生(YH, 29.42  $^{\circ}\text{C}$ ) > 杨树-甘薯(YG, 28.73  $^{\circ}\text{C}$ ),可见杨-农生态系统对林内气温具有一定的调节作用。

2.5.3 不同杨-农生态系统对大气 $\text{CO}_2$ 浓度的影响 由图11可以看出,各杨-农生态系统中大气 $\text{CO}_2$ 浓度变化不大,1d之中变化范围在364.25~446.76  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 之间,各杨-农生态系统之间差异不明显,均保持较低水平。

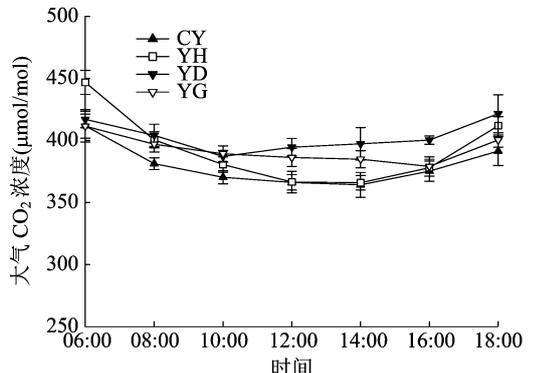


图11 大气二氧化碳浓度日变化

2.5.4 不同杨-农生态系统对林地相对湿度的影响 由图12可知,各杨-农生态系统林地相对湿度日变化趋势基本一致,与气温的变化规律恰好相反,呈现“U”形曲线。06:00时,杨树纯林(CY)的

相对湿度在4个生态系统中最低,为54.73%;而杨树-花生(YH)和杨树-甘薯(YG)的较高。杨树-甘薯(YG)林地的相对湿度在14:00时达到最低(45.53%),而杨树-花生(YH)和杨树-大豆(YD)林地的相对湿度在12:00时达到最低。杨树纯林(CY)在12:00时达到最低(36.45%),明显低于杨-农生态系统条件下的相对湿度。

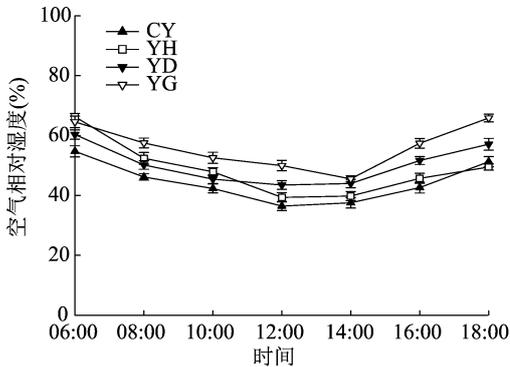


图12 相对湿度日变化

## 2.6 不同杨-农生态系统下农作物的光合特性

**2.6.1 农作物净光合速率的日变化** 由图13可知,各生态系统下农作物叶片净光合速率日变化呈不对称的双峰变化曲线,净光合速率在10:00左右达到第1个峰值;之后12:00出现“午休”现象;随后逐渐升高,在14:00时达到第2个峰值,但略低于第1个峰值;然后又逐渐下降。杨树-甘薯(YG)叶片的净光合速率最大,杨树-花生(YH)叶片的净光合速率次之。

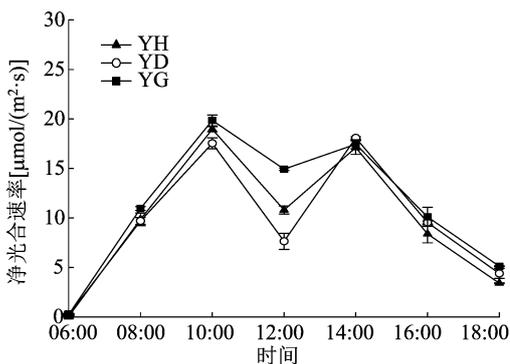


图13 农作物净光合速率日变化

**2.6.2 农作物气孔导度的日变化** 由图14可知,3种杨-农生态系统的气孔导度呈双峰曲线,杨树-花生(YH)和杨树-甘薯(YG)生态系统中的农作物叶片气孔导度在08:00时达到最大值,在14:00时达到第2个峰值;杨树-大豆(YD)生态系统中的农作物叶片的气孔导度分别在10:00、16:00达到第1、第2个峰值,该生态系统中农作物叶片的气孔导

度达到峰值的时间与另外2个杨-农生态系统中农作物不一样,这是由于气孔导度对环境因子的变化十分敏感,影响光合作用的其他因素也会对气孔导度产生一定的影响。

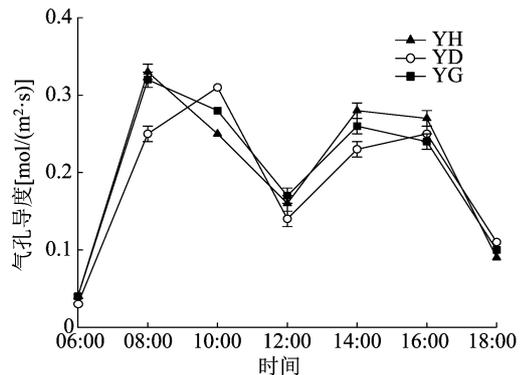


图14 各生态系统下农作物气孔导度的日变化

**2.6.3 农作物胞间CO<sub>2</sub>浓度的日变化** 由图15可以看出,不同农作物胞间CO<sub>2</sub>浓度表现出与气孔导度变化相反的趋势,总体上呈“W”形。胞间CO<sub>2</sub>浓度在早晨较高,随着光照增强和气温不断升高,叶片光合速率加快,消耗的二氧化碳更多,导致胞间CO<sub>2</sub>浓度开始下降,在10:00和14:00时达到最低;然后逐渐上升,18:00时达到最高值。杨树-花生、杨树-大豆和杨树-甘薯生态系统下各农作物叶片胞间CO<sub>2</sub>浓度日均值分别为242.99、244.79、266.45 mmol/m<sup>2</sup>。

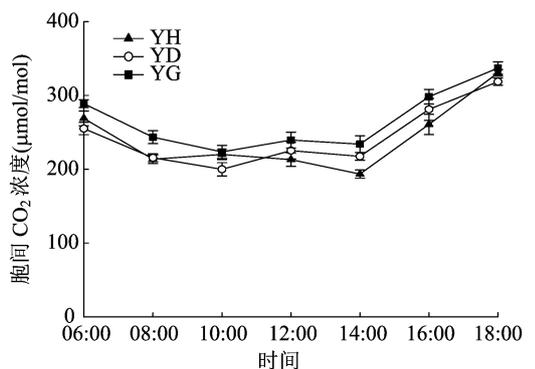


图15 各杨-农生态系统下农作物胞间CO<sub>2</sub>浓度的日变化

**2.6.4 农作物蒸腾速率的日变化** 由图16可以看出,杨-农生态系统下农作物叶片蒸腾速率日变化与气孔导度日变化趋势基本一致,呈双峰曲线。杨树-花生(YH)和杨树-甘薯(YG)的叶片蒸腾速率在08:00时达到第1个峰值,且两者差异不明显;杨树-大豆(YD)的叶片蒸腾速率在10:00时达到第1个峰值,明显低于另外2个生态系统。3个生态系统均在14:00时达到第2个峰值,杨树-花生(YH)的蒸腾速率分别比杨树-大豆(YD)、杨树-

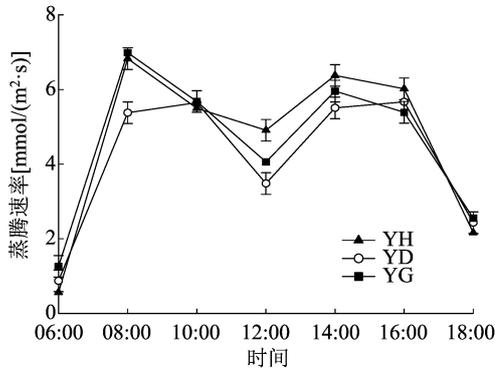


图16 作物蒸腾速率日变化

甘薯(YG)显著高 15.79%、7.05% ( $P < 0.05$ )。

### 3 讨论

各土壤理化性质间存在着紧密而复杂的相关性。陈平研究发现,各试验地间土壤理化性质存在显著差异,杨粮间作地的土壤理化性质优于纯农业用地<sup>[15]</sup>。另外,土壤全氮含量、全磷含量、有机质含量等均随土层深度的加深而降低,而土壤容重和 pH 值则随土层深度的加深而提高。杨亚东等的研究结果表明,燕麦与大豆和绿豆间作显著改变了土壤的理化性质<sup>[16]</sup>。另外姜黎等研究发现,杏树间作苜蓿有效改善了干旱区果园的土壤理化性质和表层土壤养分水平,从而促进了杏树生长<sup>[17]</sup>。与对照杨树纯林相比,杨-农生态系统土壤容重和孔隙度均有所改善,特别是杨树-大豆,改良效果表现为杨树-大豆(YD) > 杨树-花生(YH) > 杨树-甘薯(YG) > 杨树纯林(CY)。各个季节均是对照杨树纯林生态系统下的土壤养分含量最低,可见杨树人工林养分消耗较多,补充不足,该生态系统下土壤有机质含量最低,这和沿海盐土本身的性质有关,杨-农生态系统由于施肥作用相对有所改善<sup>[18]</sup>,作物的根系残留和杨树枯落物归还复合系统使有机质含量提高。

不同生态系统的林地土壤理化性质存在差异的原因比较复杂<sup>[19]</sup>,除了生物因素的直接影响,也包括非生物因素的间接影响,如土壤温湿度、土壤质地等<sup>[20]</sup>。林地土壤根系分布复杂,对土壤理化性质影响较大,微生物活性、数量和群落组成之间存在较大差异<sup>[21-23]</sup>。今后将进一步分析土壤不同层次根系生长和微生物指标,进一步探讨根系和土壤中的微生物对土壤理化性质的具体影响。

遮阴可以改善系统内林木和农作物的生长环境<sup>[24-26]</sup>,但是大范围的阴影也会对林地中的农作物产生负面影响,主要是光照不足。宋西德等对杨农

生态系统的研究表明,光照是影响农作物生长和产量的主要因素之一,当杨树完全郁闭时,树冠产生强度遮阴效果,林木遮蔽范围内的光照强度甚至大幅降低<sup>[27]</sup>。范元芳等研究发现,玉米与大豆带状间作时的遮蔽是影响大豆生长和光合特性的关键因素<sup>[28]</sup>。段志平等研究发现,间作系统中随着树龄和树冠体积的增大,遮阴造成的弱光胁迫成为影响间作物生长发育的重要因素,尤其是在小麦灌浆期<sup>[29]</sup>。本试验分析 3 种杨-农生态系统和杨树纯林生态系统下林地微环境和农作物叶片光合作用的日变化情况,可以发现林地内光辐射强度低,热辐射较小,蒸发量、蒸腾量小,降低了农作物的蒸腾速率,使林地小气候环境向着有利于林木和农作物生长的方向改变<sup>[30]</sup>。太阳直接辐射受林木遮挡,不能完全到达林冠以下,农作物的光合作用也会影响林地内微环境,相比于纯林生态系统气温较低,林地内气温增加较慢。

本试验结果表明,杨-农生态系统的林地气温普遍低于杨树纯林生态系统,但是 06:00 时杨-农生态系统林地气温稍高于杨树纯林生态系统,这是由于农作物叶片被阻挡,使地面积蓄的热量不易向空间散发,较多地保留在下层空间,从而起到了调节气温的良好作用<sup>[31]</sup>。中午前后气孔仍能正常开放,气孔导度保持在较高水平,利于空气中 CO<sub>2</sub> 进入气孔,促进光合作用。

另外,本试验在田间条件下对作物的光合作用进行测定,分析外界环境和不同物种对光合作用的影响,发现环境因子和农作物生理因子并非孤立存在,而是相互作用的<sup>[32]</sup>。农作物净光合速率的差异是外界生态环境与农作物内在生理机能以不同程度的影响力相互作用的结果。杨-农生态系统中农作物的地上部分和地下部分也存在一定的相关性,今后可进一步探讨地下部分与地上部分的联系。

### 4 结论

杨-农生态系统下,林木和农作物的生长发育过程、枯落物的分解和植物根系的死亡等因素可以改善土壤理化性质。随着土层的加深,土壤容重逐渐提高,总孔隙度逐渐降低,两者变化大体呈现相反趋势。在 0~40 cm 的土层中,随着土层的加深,土壤含水量提高,杨-农生态系统土壤含水量是杨树纯林的 1.08~1.17 倍。相较于杨树纯林生态系统,杨-农生态系统可使林地的土壤有机质含量提

高 5.25% ~ 21.06%。杨树纯林生态系统下,土壤全氮和速效钾含量较低,经各个土层对比可以发现,杨-农生态系统对 0~10 cm 土层的养分含量影响最大。另外,植株的遮阴作用会影响农作物生长生理动态变化。杨-农生态系统的光合有效辐射比杨树纯林生态系统低 14.54% ~ 33.59%。杨-农生态系统的林地气温普遍低于杨树纯林生态系统,相对湿度的变化趋势与其相反。蒸腾速率与气孔导度之间存在密切关系,变化曲线趋势相似,相关性分析结果表明,叶片蒸腾速率与气孔导度呈显著正相关关系,日均值变化趋势基本一致。

#### 参考文献:

[1] 孙建,刘子琦,朱大运,等. 石漠化治理区不同生态恢复模式土壤质量评价[J]. 水土保持研究,2019,26(5):222-228.

[2] 吴旭,唐亚坤,陈晨,等. 黄土丘陵区沙棘、油松和刺槐光合生理特性及其环境适应性[J]. 生态学报,2019,39(21):8111-8125.

[3] Martinelli G D C, Schlindwein M M, Padovan M P, et al. Environmental performance of agroforestry systems in the cerradobiome, Brazil[J]. World Development, 2019, 122:339-348.

[4] Cherubin M R, Chavarro - Bermeo J P, Silva - Olaya A M. Agroforestry systems improve soil physical quality in Northwestern Colombian Amazon[J]. Agroforestry Systems, 2019, 93:1741-1753.

[5] 施士争,路明,王红玲,等. 江苏苏北杨树农田林网更新主栽树种选择研究[J]. 江苏林业科技, 2017, 44(6):27-31.

[6] Zhang X P, Gao G B, Wu Z Z, et al. Agroforestry alters the rhizosphere soil bacterial and fungal communities of moso bamboo plantations in subtropical China[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 143:192-200.

[7] Mouysset L, Assa C R, Ay J S, et al. Bioeconomic impacts of agroforestry policies in France[J]. Land Use Policy, 2019, 85:239-248.

[8] Boinot S, Fried G, Storkey J, et al. Alley cropping agroforestry systems: reservoirs for weeds or refugia for plant diversity? [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2019, 284:106584.

[9] 李勇美. 苏北沿海林农复合经营系统光能利用率研究[D]. 南京:南京林业大学, 2012.

[10] 王华,熊静,邢文黎. 苏北沿海围垦区刺槐和怪柳林地土壤养分研究[J]. 华东森林经理, 2018, 32(4):1-5.

[11] 袁钟鸣,程雪飞,王金平,等. 苏北泥质海岸带滩涂区丛枝菌根真菌侵染及土壤因子[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(7):123-129.

[12] 王彤,封超年,靳瑞萍,等. 苏北滨海盐碱土壤盐碱化特征[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(19):339-343.

[13] 楼锦花,胡建,葛云,等. 苏北滨海盐碱土壤性质演化及其对脱盐规律的启示[J]. 海岸工程, 2018, 37(3):34-42.

[14] 朱凤武,徐彩潏,濮励杰,等. 苏北滩涂围垦区土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征[J]. 中国土地科学, 2017, 31(12):77-83.

[15] 陈平. 苏北地区林粮间作系统的土壤性状及林木对小麦他感作用研究[D]. 南京:南京林业大学, 2004.

[16] 杨亚东,冯晓敏,胡跃高,等. 豆科作物间作燕麦对土壤固氮微生物丰度和群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3):957-965.

[17] 姜黎,郑银,刘国军,等. 果园间作模式下杏树与苜蓿的根系分布特征及其土壤理化性质研究[J]. 西北植物学报, 2017, 37(12):2489-2495.

[18] Niether W, Schneidewind U, Fuchs M, et al. Below and aboveground production in cocoa monocultures and agroforestry systems [J]. Science of The Total Environment, 2019, 657:558-567.

[19] Zemp D C, Ehbrecht M, Seidel D, et al. Mixed - species tree plantings enhance structural complexity in oil palm plantations [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 283:106564.

[20] Apuri I, Peprah K, Achana G T W. Climate change adaptation through agroforestry: The case of Kassena Nankana West District, Ghana [J]. Environmental Development, 2018, 28:32-41.

[21] Pnos D, Haggard J, Saenz L, et al. Contribution of agroforestry systems to sustaining biodiversity in fragmented forest landscapes [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2019, 283:106567.

[22] Liu C G, Jin Y Q, Hu Y N, et al. Drivers of soil bacterial community structure and diversity in tropical agroforestry systems [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2019, 278:24-34.

[23] 曾诗媛,丁立忠,马闪闪,等. 施用沼渣、黄腐酸钾、钙镁磷肥对退化山核桃林的改土和增产效果[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(3):618-623.

[24] Hernandez - Aguilera J N, Conrad J M, Miguel I G, et al. The economics and ecology of shade - grown coffee: A model to incentivize shade and bird conservation [J]. Ecological Economics, 2019, 159:110-121.

[25] Quandt A, Neufeldt H, McCabe J T. The role of agroforestry in building livelihood resilience to floods and drought in semiarid Kenya [J]. Ecology and Society, 2017, 22(3):10.

[26] Re G A, Piluzza G, Sanna F, et al. Polyphenolic composition and antioxidant capacity of legume - based swards are affected by light intensity in a Mediterranean agroforestry system [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(1):191-198.

[27] 宋西德,刘粉莲,张永. 黄土丘陵沟壑区林农复合生态系统立体经营模式研究[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(4):43-46.

[28] 范元芳,刘沁林,王锐,等. 玉米-大豆带状间作对大豆生长、光合荧光特性及产量的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(5):972-978.

[29] 段志平,刘天煜,张永强,等. 离树间距对枣麦间作小麦光合特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(11):1445-1452.

[30] Sauvadet M, den Meersche K V, Allinne C, et al. Shade trees have higher impact on soil nutrient availability and food web in organic than conventional coffee agroforestry [J]. Science of The Total Environment, 2019, 649:1065-1074.

[31] Caron B, Sgarbossa J, Schwerz F, et al. Dynamics of solar radiation and soybean yield in agroforestry systems [J]. Anais da Academia Brasileira de Ciencias, 2018, 90(4):3799-3812.

[32] Chain - Guadarrama A, Martínez - Salinas A, Aristizábal N, et al. Ecosystem services by birds and bees to coffee in a changing climate: A review of coffee berry borer control and pollination [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 280:53-67.