

## 农旅融合背景下水田改林地对土壤性质影响<sup>①</sup>

杨东伟<sup>1,2,3</sup>, 姜文莹<sup>1</sup>, 王丽丽<sup>1</sup>, 陈方园<sup>1</sup>, 章明奎<sup>2\*</sup>

(1 海南热带海洋学院, 海岛旅游资源数据挖掘与监测预警技术文化和旅游部重点实验室, 海南三亚 572000; 2 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 3 广西大学商学院, 南宁 530004)

**摘要:** 为探讨农旅融合背景下土地利用方式改变对土壤理化及生物学特性的影响, 在浙江省绍兴市境内选择代表性土壤剖面, 分层采集土壤样品, 采用田间调查与室内分析方法, 研究了水田改制后土壤剖面性态及土壤微生物特性的演变。结果表明: 水田改林地后地下水位明显下降, 表层土壤坚实度增加了 6.79 倍, 容重增加了 33.7%; 土壤颜色亮度和彩度增加, 土壤结构体增大; 表层土壤全铁和游离铁含量增幅分别为 7.44% 和 8.70%; 表层土壤活性铁和亚铁含量降幅分别为 18.20% 和 91.56%; 土壤微生物磷脂脂肪酸总量下降 44.57%, 好氧细菌/厌氧细菌比值增加 92.6%, 革兰氏阴性细菌/革兰氏阳性细菌比值下降 45.3%。总之, 农旅融合背景下水田改林地后土壤理化性质发生明显变化, 对植被和土壤微生物生长带来负面影响, 不利于土壤可持续利用。

**关键词:** 土地利用; 农旅融合; 土壤形态; 土壤理化性质

中图分类号: S152; S154 文献标志码: A

## Effect of Land-use Change from Paddy Field to Forest Land on Soil Properties Under Background of Integration of Agriculture and Tourism

YANG Dongwei<sup>1,2,3</sup>, JIANG Wenying<sup>1</sup>, WANG Lili<sup>1</sup>, CHEN Fangyuan<sup>1</sup>, ZHANG Mingkui<sup>2\*</sup>

(1 Key Laboratory of Data Mining, Monitoring and Early Warning Technology for Island Tourism Resources, Ministry of Culture and Tourism, Hainan Tropical Ocean University, Sanya, Hainan 572000, China; 2 College of Environment and Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3 Business College, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** In order to explore the relationship between land-use change and soil physicochemical and biological properties under the background of the integration of agriculture and tourism, and clarify the impact of land-use change from paddy fields to economic forest lands on soil properties, several representative soil profiles in Shaoxing City, Zhejiang Province, were selected and layer samples were collected, and the evolution of soil properties, morphology and microbial characteristics were studied. The result showed after the land-use transformation from paddy field to forest land, the groundwater level decreased obviously, soil compactibility of surface layer increased by 6.79 times while bulk density increased by 33.7%. Soil color brightness and chromaticity increased, soil structure size increased. The contents of total and free iron increased by 7.44% and 8.70%, however active and ferrous iron decreased by 18.20% and 91.56%, respectively. Moreover, total amount of phospholipid fatty acids of soil microorganisms decreased by 44.57%, the ratio of aerobic to anaerobic bacteria increased by 92.6%, and the ratio of Gram-negative bacteria to Gram-positive bacteria decreased by 45.3%. In conclusion, the land-use change from paddy field to forest land can obviously change soil physicochemical properties under the background of the integration of agriculture and tourism, which has adverse effects on the growth of vegetation and microorganisms and uncondusive to the sustainable utilization of soil.

**Key words:** Land use; Integration of agriculture and tourism; Soil morphology; Soil physicochemical properties

随着我国休闲农业和乡村旅游的快速发展,浙江一些农村地区积极推进农旅融合,推动农业结构调

整,优化乡村空间结构,开发乡村旅游资源,建设乡村旅游设施,开展农家乐,将一些水田转换为休闲农

①基金项目: 2021 年海南省哲学社会科学研究基地课题(HNSK(JD)21-34), 2021 年海南省自然科学基金高层次人才项目(421RC591), 2020 年度海南热带海洋学院科研启动资助项目(RHDRC2020015)和海岛旅游资源数据挖掘与监测预警技术文化和旅游部重点实验室项目(KLITRDMM2023)资助。

\* 通讯作者(mkzhang@zju.edu.cn)

作者简介: 杨东伟(1980—), 男, 河南商丘人, 博士, 讲师, 主要研究方向为土地利用与旅游生态环境。E-mail: dwyang@hntou.edu.cn

业和乡村旅游发展用地，改种经济林、花卉、苗圃、果树等经济作物，以迎合游客的休闲娱乐、观赏游玩、采摘体验等需求。土地利用方式改变后，水分管理、养分管理、耕作方式及人为活动对土壤的干扰作用发生相应变化，土壤水热状况改变，继而引起土壤形态、养分状况和微生物群落发生演变。

目前，农业生态环境已成为国内外研究热点，很多学者开展了农业旅游地生态环境保护<sup>[1-2]</sup>，以及土地利用方式改变后土壤 pH、有机质和养分等性质变化<sup>[3-6]</sup>等方面研究，而关于农旅融合背景下水田改林地后土壤形态特征及微生物群落演替方面的研究却鲜有报道。因此，本研究以浙江省宁绍水网平原为研究区，利用空间替代时间，系统研究农业旅游因素影响下水田改林地后土壤剖面形态学特征、土壤环境因子及微生物群落的演变趋势，准确监测水田改制后土壤环境指标和微生物指标的变化，为深入理解乡村土地利用方式改变后土壤生态环境变化，促进乡村旅游地土壤生态保护，实现土地资源可持续利用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于浙江省绍兴市柯桥区福全镇赵家畈

村，平均海拔为 4.8 m，地处宁绍河网平原，属于中北亚热带季风气候过渡带，平均气温为 15.0 ~ 18.1℃，年均降水量为 1 060 ~ 2 000 mm，成土母质为湖相沉积物，土壤为青紫泥，在土壤系统分类中属于铁渗水耕人为土<sup>[7]</sup>。近年来，研究区积极推进农旅融合发展，水田改为休闲农业和乡村旅游发展用地，推广休闲农业观光和农家乐等旅游形式，在种植经济作物的同时，发展乡村旅游。

### 1.2 土样采集

选择种植水稻及种植樟树 12 a 和 19 a(由水田改成林地，简称“水改林”)的 3 块样地，采集铁渗水耕人为土系列剖面土壤样品。每一样地设置 3 个重复剖面，所有剖面之间直线距离不超过 200 m。水田样品采集时，田面落干；樟树林采样时，选择两棵樟树中间空地，以尽量避免破坏樟树根系。剖面均挖掘到地下水位以下，根据土壤发育状况，确定土壤发生层深度。采集分层土壤样品时，将 3 个重复剖面相同发生层土壤混合构成 1 个混合土样。将采集的土样分为两部分：一部分风干后，过 0.25 mm 和 0.15 mm 土筛，用于土壤理化指标测定；另一部分用冰块冷藏带回实验室，冷冻干燥后置于 -80 ℃ 冰箱，用于测定土壤微生物磷脂脂肪酸含量。样地信息详见表 1。

表 1 土壤剖面样地信息  
Table 1 Basic information of soil profiles

剖面号 (a)	水改林年限	纬度	经度	利用方式	肥料施用量(kg/hm <sup>2</sup> )				
					尿素	过磷酸钙	氯化钾	复合肥	鸡粪
ZJP-33	0	29°58'27"N	120°30'2"E	水田	180 ~ 300	375 ~ 525	150 ~ 225	150 ~ 300	-
ZJP-04	12	29°58'28"N	120°30'1"E	林地	150 ~ 300	525 ~ 675	150 ~ 225	675 ~ 825	12 000 ~ 18 000
ZJP-06	19	29°58'27"N	120°30'0"E	林地	150 ~ 300	525 ~ 675	150 ~ 225	675 ~ 825	12 000 ~ 18 000

### 1.3 样品测定与数据分析

土壤颜色采用芒塞尔土壤标准比色卡法鉴定(新版标准土色帖，日本)；自然含水量采用烘干法测定；容重采用环刀法测定；坚实度用土壤耐压力表示，采用坚实度计测定。土壤有机质采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定；全氮采用凯氏定氮法测定；碱解氮采用碱解扩散法测定；全量铁采用 HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub> 消化、游离态铁采用 DCB(连二硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠)法提取、活性铁采用草酸铵-草酸缓冲液(pH 3.2)提取、亚铁采用 Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 溶液提取，然后采用邻菲啰啉比色法测定。各指标具体测定步骤详见文献[8-9]。

土壤微生物磷脂脂肪酸(PLFAs)测定方法如下：称取 3.000 g 冷冻干燥后的土壤样品于特氟龙管内，用氯仿-甲醇-柠檬酸盐缓冲液提取总脂类，通过硅胶柱层析法分离得到磷脂脂肪酸，然后经碱性甲酯化后用气相色谱分析土壤微生物磷脂脂肪酸的含量。气相色谱分析仪为 Agilent 6890N 气相色谱仪(FID 检测器)。同时，结合 MIDI Sherlock 微生物鉴定系统(Version 4.5)对各成分脂肪酸进行鉴定，并生成磷脂脂肪酸图谱，以正十九烷酸甲酯(19:0)作为内标<sup>[10]</sup>。

文中土壤剖面及发生层形态采用佳能相机(EOS M3)拍照，文中数据采用 Excel 2016 进行整理和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤物理性状变化

研究区水田改林地后, 地下水位明显下降, 从 95 cm 下降到 112 cm(图 1)。土壤结构体类型发生变化, 表层土壤由团块状(长度以 5~30 mm 为主)转变为块状(长度以 15~60 mm 为主); 亚表层土壤由块状(长度以 20~50 mm 为主)转变为大块状(长度以 >40 mm 为主); 水田耕作层和犁底层土壤中锈色斑纹分别约占结构面的 30% 和 25%, 改林地后锈色斑纹逐渐减少直至消失(图 1、图 2 和表 2), 根孔颜色变暗, 连续性被破坏(图 2 和表 2)。水田土壤犁底层中存在大块鳞血斑(图 2F), 改林地后鳞血斑数量减少, 最后完全消失(图 2 和表 2)。水改林 12 a 后, 土壤颜色亮度和彩度增加, 表层和亚表层土壤由棕黑色(2.5Y3/1)和橄榄黑色(5Y3/1)转变为暗灰黄色(2.5Y4/2)和灰色(5Y4/1), 水

改林 19 a 后转变为暗灰黄色(2.5Y4/2)(图 1、图 2 和表 2); 淀积层颜色变化不明显, 上部为灰色(7.5Y4/1), 下部为黑色(2.5GY 2/1), 并含有大量赤褐色(5YR4/4)铁锰斑纹和豆渣状铁锰聚集体(图 2C 和 2D); 潜育层(脱潜层)下部土壤均为灰色(N5/0), 其颜色变化不明显(图 1、图 2 和表 2)。

由图 3 可知, 水改林后, 表层和亚表层土壤含水率明显下降, 土壤各发生层坚实度均增加, 其中耕作层土壤坚实度从 0.38 kg/cm<sup>3</sup> 增加到了 2.06 kg/cm<sup>3</sup> 和 2.96 kg/cm<sup>3</sup>, 最大增幅为 6.79 倍。水田表层和亚表层土壤容重分别为 0.95 和 1.07 g/cm<sup>3</sup>, 水改林 12 a 土壤增加到 1.18 和 1.20 g/cm<sup>3</sup>, 水改林 19 a 土壤增加到 1.27 和 1.29 g/cm<sup>3</sup>, 最大增幅可达 33.7%。水改林后土壤孔隙度呈下降趋势, 耕作层土壤孔隙度最大降幅达 18.4%, 剖面中淀积层(氧化还原层)上部土壤坚实度和容重整体高于其他发生层。



(ZJP-33、ZJP-04 和 ZJP-06 分别代表水田、水改林 12 a 和水改林 19 a 土壤剖面)

图 1 水田和林地土壤剖面  
Fig. 1 Soil profiles of paddy field and forest lands

### 2.2 土壤化学性质变化

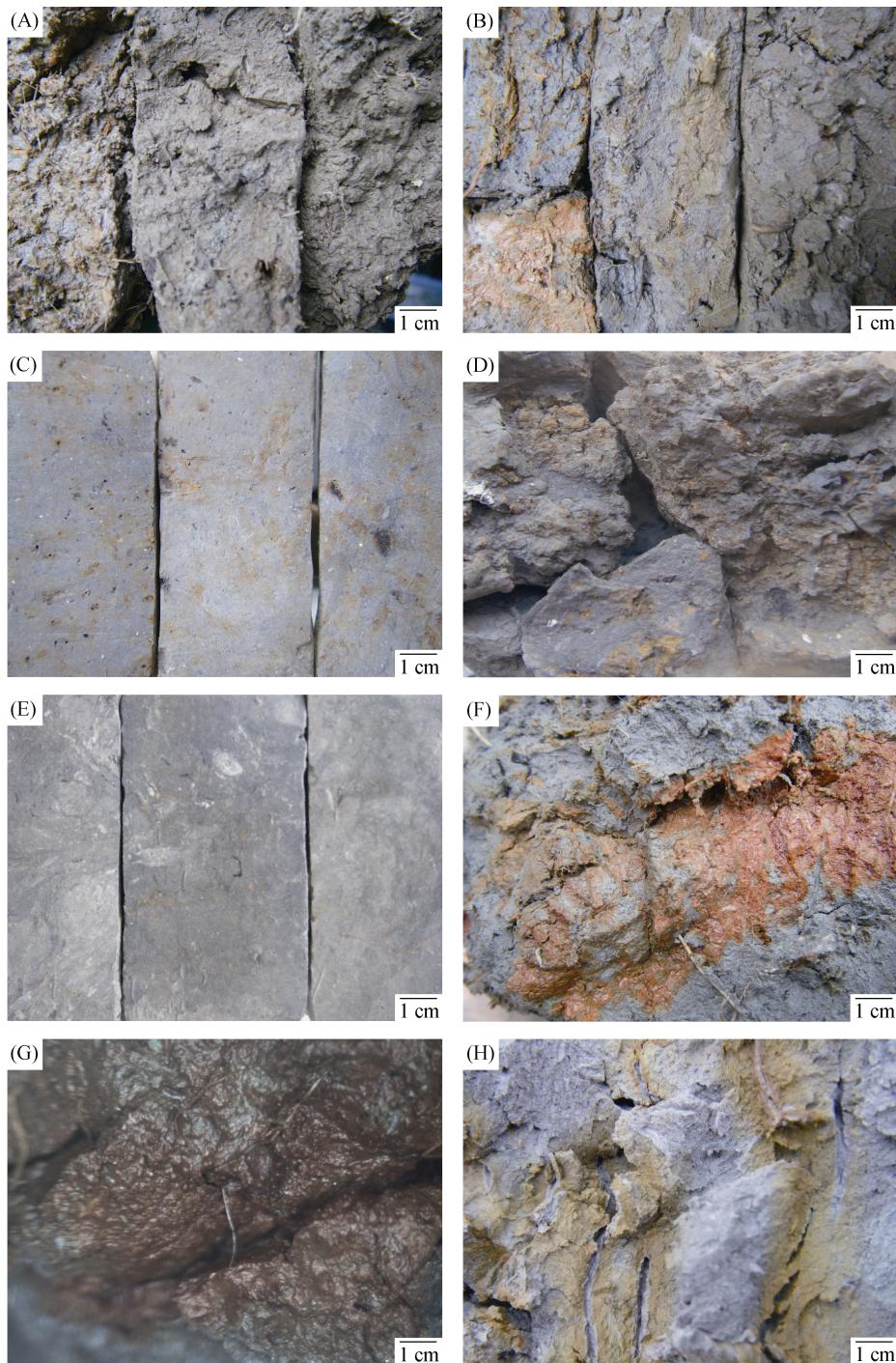
水改林后, 土壤 pH 明显下降, 表层土壤 pH 从 5.57 下降到 4.55。由于水田表层灌溉水淋溶作用影响, 水田亚表层土壤 pH 略低于林地土壤。水改林后土壤有机质含量下降, 表层和亚表层土壤下降最为明显, 最大降幅分别达到 42.08% 和 57.06%(图 4)。

从图 5 可以看出, 水改林 19 a 后, 土壤表层和

亚表层中全铁和游离氧化铁含量增加, 土壤表层全铁和游离氧化铁增幅分别为 7.44% 和 8.70%; 土壤表层和亚表层活性铁含量下降, 降幅分别为 18.20% 和 47.70%。淀积层上部(25~47 cm)受地表水和地下水影响较小, 土壤水分含量降低, 致使土壤中部分活性铁转化为晶质铁, 从而引起该发生层中的土壤活性铁含量降低。由于离子态铁“泵升”到第四层(47~88 cm)

而淀积，致使该层土壤活性铁含量略微增加，这与 Sah 等<sup>[11]</sup>关于离子态铁“泵升”到上层土壤的结论基本一致。水田耕作层和犁底层土壤中铁氧化物的晶胶

比分别为 0.67 和 1.03，水改林 12 a 后分别增加到 1.06 和 1.90，水改林 19 a 后分别增加到 1.22 和 3.14，这主要与土壤中大量活性铁逐渐老化为晶质铁有关。



(A: 耕作层(从左至右依次为水田、水改林 12 a 和 19 a 土壤, B、C、D 和 E 图同); B: 犁底层; C: 淀积层上部; D: 淀积层下部; E: 脱潜层斑纹及色彩对比照; F: 水田犁底层鳞血斑原图; G: 水田犁底层鳞血斑显微镜下照片; H: 水改林 12 a 土壤脱潜层根孔)

图 2 水田和林地土壤剖面各发生层形态特征

Fig. 2 Morphology characteristics of different layers of soil profiles in paddy field and forest lands

表2 水改林后土壤剖面形态特征变化

Table 2 Changes of morphology characteristics with land-use conversion from paddy field to forest land

剖面号	深度 (cm)	发生层	土壤结构	土壤颜色(润)	新生体		
					类型	占结构体表面比例(%)	大小 (mm)
ZJP-33	0~12	耕作层	团块状(5~30 mm为主)	棕黑色(2.5Y3/1); 暗赤褐色(2.5YR3/3, 锈斑)	铁锈斑纹	30	2~5
	12~22	犁底层	块状(20~50 mm为主)	橄榄黑色(5Y3/1)	铁锈斑纹	25	2~5
	22~47	淀积层	棱块状(50~100 mm为主)	灰色(7.5Y4/1)	铁锈斑纹	12	1~4
	47~88	淀积层	棱块状(40~100 mm为主)	黑色(2.5GY2/1); 赤褐色(5YR4/3, 铁锰斑)	铁锰斑纹	25	2~5
	88~130	潜育层	软化状	灰色(N5/0)	铁锈斑纹	0	—
	0~12	耕作层	块状(15~40 mm为主)	暗灰黄色(2.5Y4/2)	铁锈斑纹	5	1~2
ZJP-04	12~22	犁底层	大块状(>40 mm为主)	灰色(5Y4/1)	铁锈斑纹	15	1~3
	22~47	淀积层	大棱块状(60~130 mm为主)	灰色(7.5Y4/1)	铁锈斑纹	10	1~5
	47~88	淀积层	大棱块状(50~120 mm为主)	黑色(2.5GY2/1); 赤褐色(5YR4/4, 铁锰斑)	铁锰斑纹	30	2~5
	88~130	脱潜层	软化状(脱潜层下部)	灰色(N5/0)	铁锈斑纹	15	1~2
ZJP-06	0~12	耕作层	块状(30~60 mm为主)	暗灰黄色(2.5Y4/2)	铁锈斑纹	0	—
	12~22	犁底层	大块状(>50 mm为主)	暗灰黄色(2.5Y4/2)	铁锈斑纹	5	1~2
	22~47	淀积层	大棱块状(80~150 mm为主)	灰色(7.5Y4/1)	铁锈斑纹	10	1~5
	47~88	淀积层	大棱块状和片状(70~140 mm为主)	黑色(2.5GY2/1); 赤褐色(5YR4/4, 铁锰斑)	铁锰斑纹	30	2~5
	88~130	脱潜层	软化状(脱潜层下部)	灰色(N5/0)	铁锈斑纹	15	1~2

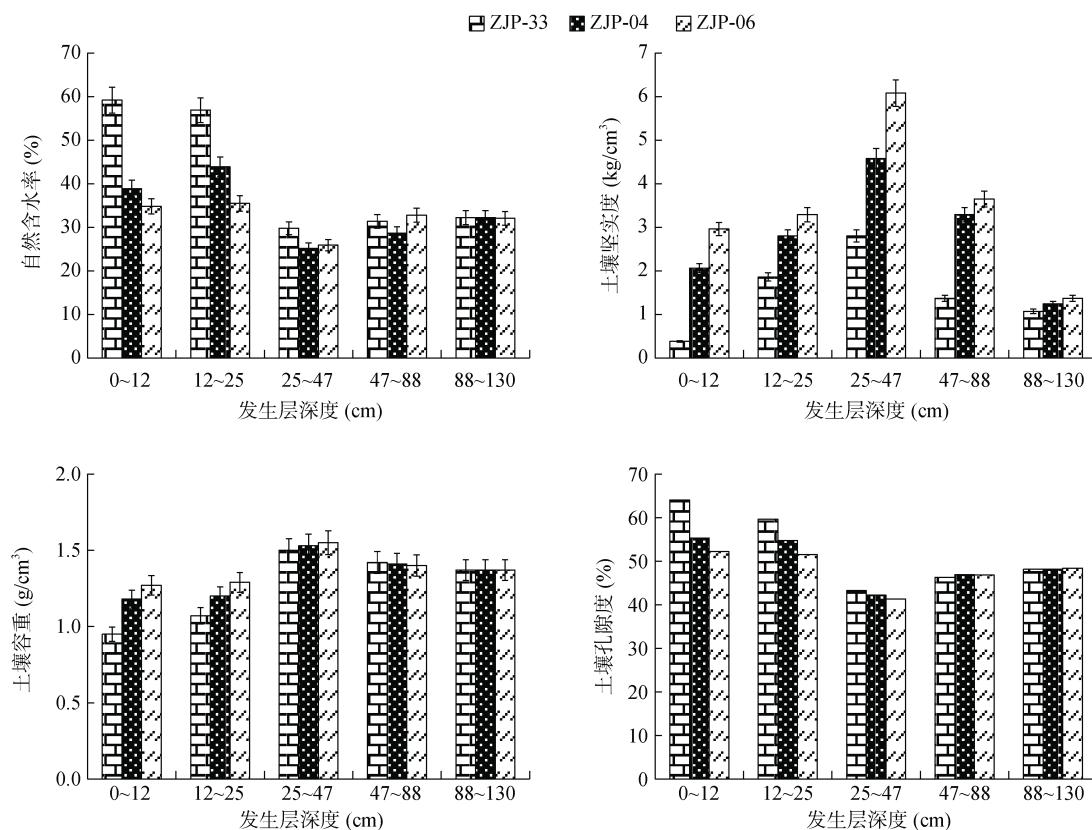


图3 水改林后土壤物理性质变化

Fig. 3 Changes of soil physical properties with land-use conversion from paddy field to forest land

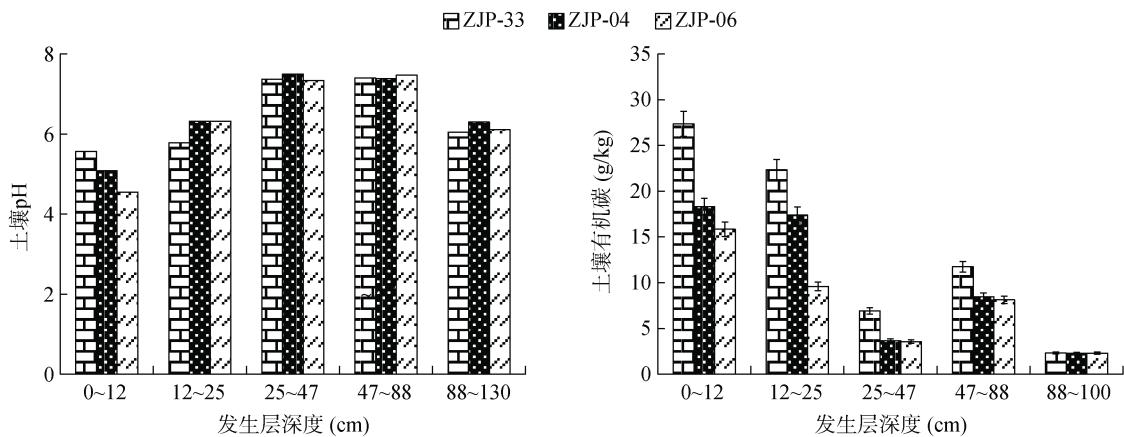


图 4 水改林后土壤 pH 和有机质变化

Fig. 4 Changes of soil pH and organic matter with land-use conversion from paddy field to forest land

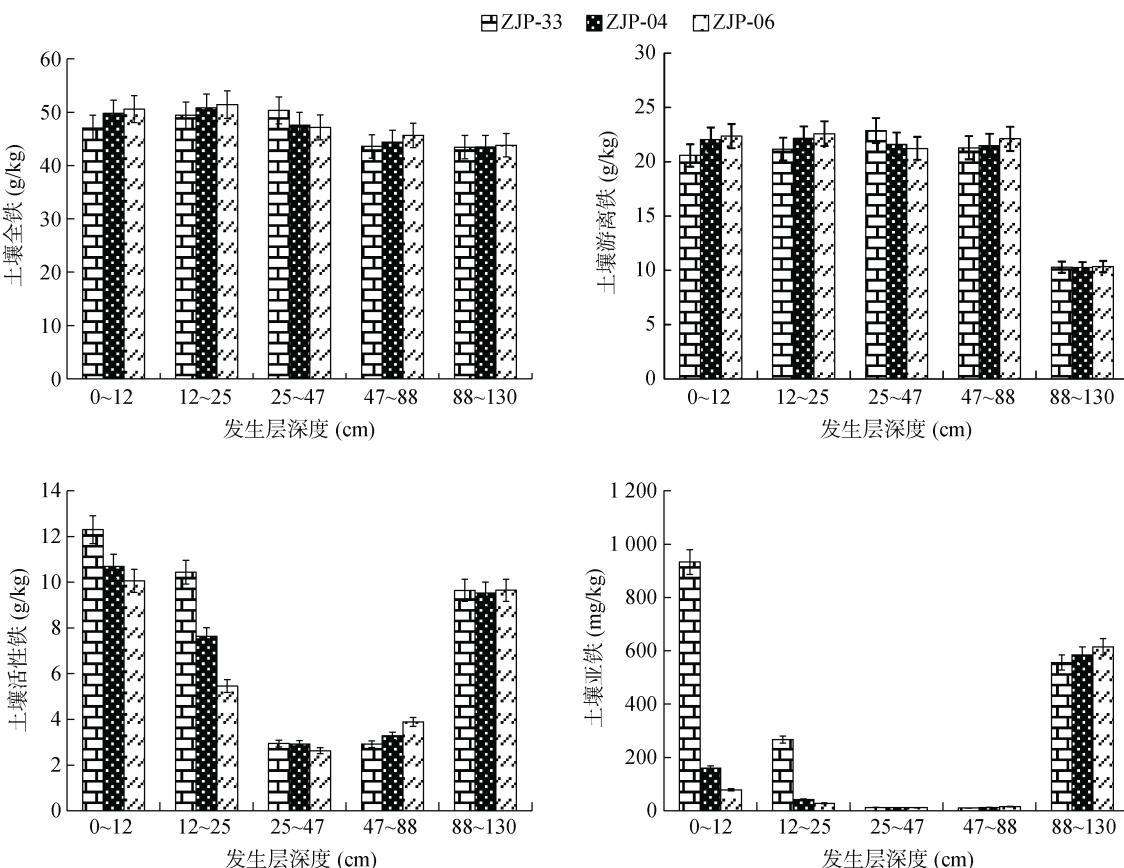


图 5 水改林后土壤氧化铁含量变化

Fig. 5 Changes of soil iron oxide content with land-use conversion from paddy field to forest land

水改林后，土壤剖面中亚铁含量呈降低趋势，其中表层和亚表层土壤亚铁含量降低最明显，其中水改林 19 a 后耕层土壤亚铁仅为水田土壤耕层含量的 8.44%(图 5)。土壤亚铁与活性铁的变化趋势基本一致，土壤剖面中亚铁与活性铁呈极显著正相关，相关系数为 0.75。而剖面中淀积层的亚铁含量，明显低于其他发生层(图 5)。

### 2.3 土壤微生物多样性变化

土壤微生物 PLFAs 分析(图 6、表 3)表明，水改林后耕层土壤微生物含量及多样性发生明显变化。水田、水改林 12 a 和水改林 19 a 土壤微生物 PLFAs 总量分别为 198.14、127.14 和 109.82 nmol/g 土，最大降幅为 44.57%。对图 6 中含量较高的典型 PLFAs 生物标记进行分析，代表放线菌的特征脂肪酸 16:0

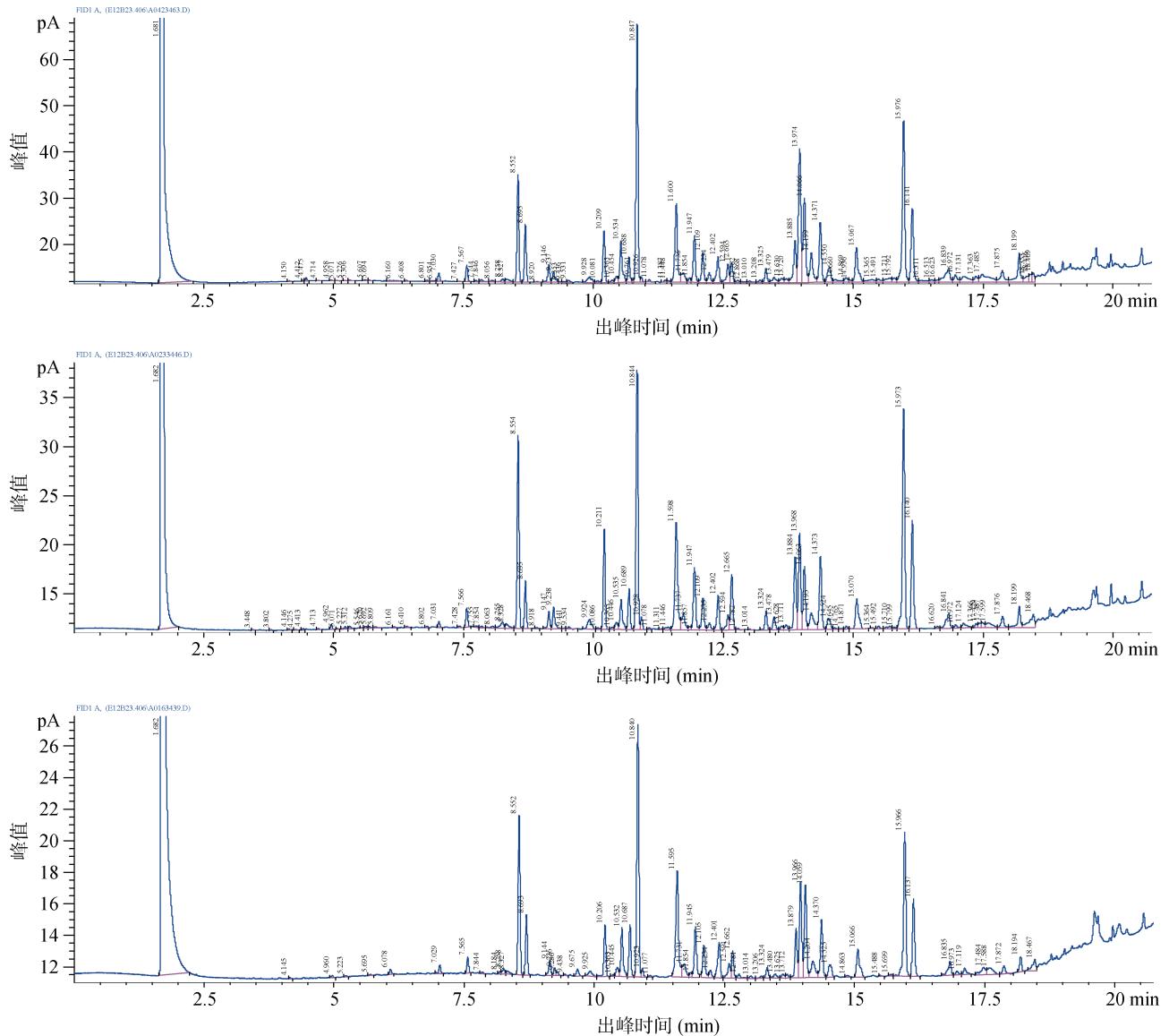


图 6 水改林后土壤耕作层微生物 PLFAs 图谱变化

Fig. 6 Changes of PLFAs chromatography of soil microbes in tillage layers with land-use conversion from paddy field to forest land

表 3 土壤耕作层微生物 PLFAs 含量  
Table 3 PLFAs contents of microbes in tillage layers

特征脂肪酸	出现位置(min)	微生物类型	磷脂脂肪酸含量(nmol/g 土)			相对含量(%)		
			ZJP-33	ZJP-04	ZJP-06	ZJP-33	ZJP-04	ZJP-06
i15:0	8.552 ~ 8.554	好氧细菌	14.41	14.53	12.87	7.27	11.43	11.72
i16:0	10.206 ~ 10.211	好氧细菌	5.03	5.03	5.702	2.54	3.96	5.19
18:1ω7c	13.966 ~ 13.974	厌氧细菌	13.30	7.86	3.89	6.71	6.18	3.54
18:1ω9c	13.879 ~ 13.885	真菌	12.55	10.41	5.79	6.33	8.19	5.27
16:0 10Me	11.595 ~ 11.600	放线菌	15.10	10.32	8.30	7.62	8.12	7.56
18:0	14.370 ~ 14.373	嗜热解氢杆菌	5.92	4.85	2.88	2.99	3.81	2.62
16:0	10.840 ~ 10.847	细菌	26.59	23.39	14.59	13.42	18.40	13.29
19:0 cyc ω8c	15.966 ~ 15.976	细菌	16.85	13.10	11.30	8.50	10.30	10.29

10Me, 从 10.32 nmol/g 土下降到 8.30 nmol/g 土; 代表真菌的特征脂肪酸 18:1 $\omega$ 9c, 从 12.55 nmol/g 土下降到 5.79 nmol/g 土; 代表厌氧细菌的特征脂肪酸 18:1 $\omega$ 7c 的绝对含量和相对含量分别降低了 70.8% 和 47.2%。代表好氧细菌的特征脂肪酸 i15:0 和 i16:0 的相对含量在水改林 19 a 后, 分别增加了 61.2% 和 104.3%。

通常采用一种或多种 PLFAs 生物标记表示土壤细菌、真菌、放线菌、原生动物等微生物的绝对含量和相对丰度, 如用 cy19:0 $\omega$ 8c、i19:0、18:1 $\omega$ 7c、18:1 $\omega$ 5c、18:00、17:0 ISO 3OH、cy 17:0、a17:0、17:00、a16:0、16:1 $\omega$ 9c、16:1 $\omega$ 5c、16:00、16:0 Nalcohol、15:0 3OH、15:0 2OH、i15:0、15:00、a15:0、i14:0、14:00 和 12:00 表征细菌的特征脂肪酸; 用 20:1 $\omega$ 9c、18:3 $\omega$ 6c(6,9,12)、18:2 $\omega$ 6c 和 18:1 $\omega$ 9c 来表征真菌的特征脂肪酸; 用 19:0(10Me)、18:0(10Me)、17:0(10Me)

和 16:0(10Me)表征放线菌的特征脂肪酸; 用 20:2 $\omega$ 6,9c 和 20:4 $\omega$ 6,9,12,15c 来表征原生动物的特征脂肪酸; 用 18:1 $\omega$ 5c、18:1 $\omega$ 7c、cy17:0、17:1 $\omega$ 8c、和 16:1 $\omega$ 5c 表征革兰氏阴性细菌的特征脂肪酸; 用 a18:0、a17:0、i17:0、a16:0、i16:0、a15:0、i15:0 和 i14:0 表征革兰氏阳性细菌的特征脂肪酸; 用 18:1 $\omega$ 7c 表征厌氧细菌的特征脂肪酸; 用 17:0、a17:0、i17:0、i16:0、a15:0、i15:0 和 15:0 表征好氧细菌的特征脂肪酸<sup>[12-17]</sup>。本研究中, 水改林后土壤微生物 PLFAs 总量下降 44.57%, 放线菌/细菌比值和原生动物/细菌比值的最大增幅分别为 7.69% 和 16.67%。在水田、水改林 12 a 和水改林 19 a 土壤中好氧细菌与厌氧细菌比值分别为 2.82、3.89 和 5.43, 最大增幅可达 92.6%; 革兰氏阴性细菌与革兰氏阳性细菌比值分别为 0.64, 0.44 和 0.35, 最大降幅为 45.3%(表 4)。

表 4 耕层土壤中不同种类土壤微生物比例  
Table 4 Ratios of different microbes in tillage layers

剖面号	总 PLFAs(nmol/g 土)	真菌/细菌	放线菌/细菌	原生动物/细菌	革兰氏阴性细菌/革兰氏阳性细菌	好氧细菌/厌氧细菌
ZJP-33	198.14	0.110	0.156	0.018	0.636	2.816
ZJP-04	127.14	0.126	0.165	0.021	0.436	3.887
ZJP-06	109.82	0.085	0.168	0.021	0.348	5.429

### 3 讨论

#### 3.1 土壤物理性质演变特征及机理

在乡村旅游和农业不断融合发展的背景下, 大面积水田转换为休闲农业和乡村旅游发展用地而改种经济作物。水田改林地后, 由于地表灌溉水补给量明显减少, 地下水位及表层土壤含水率呈现下降趋势, 这与方利平和章明奎<sup>[18]</sup>的研究结果基本一致。随着土壤含水率下降, 土粒之间因水分降低而发生收缩, 伴随着活性铁因脱水向晶质铁的转化, 氧化铁胶结其他矿物形成坚实的结构体<sup>[8]</sup>, 土体颗粒由于氧化铁的胶结而硬化, 引起土壤坚实度增加、结构体体积增大; 加之有机质含量下降、翻耕减少和游人踩踏等因素影响, 进一步加剧土壤硬化, 并引起土壤容重增加, 土壤孔隙度下降, 不利于作物生长。水田改林地后, 土壤表层淹水饱和与排水落干的干湿交替情况不复存在, 锈色斑纹、鳞血斑等新生体很难形成, 水田中原有的锈色斑纹和鳞血斑逐渐失去鲜亮色泽、逐步淡化和破碎化, 最后与整个土体混合直至消失。由于土壤挤压和黏粒淀积等因素影响, 淀积层上部土壤坚实度和容重均高于其他发生层。水田改林地后, 随着土壤有机质含量下降、大量 Fe(II)被氧化为 Fe(III)等因素

影响<sup>[8,19]</sup>, 土壤颜色亮度和彩度增加。

#### 3.2 土壤化学性质演变特征及机理

水田改林地后, 水田土壤中原有的大量 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 在硝化细菌的作用下转化为 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, 同时大量 Fe<sup>2+</sup>和 Mn<sup>2+</sup>等离子被氧化, 释放出氢离子, 加之酸性肥料施用量增加, 引起表层土壤 pH 下降。水田淹水条件下, 土壤水分条件限制了空气中的氧气向土壤扩散, 改林地后, 土壤更加充分地暴露在空气中, 加速了土壤有机质的化学氧化; 加之进入土壤的植物残体减少以及微生物分解有机质速度加快等因素影响, 土壤有机质含量下降, 其中表层和亚表层土壤有机质含量下降最为明显。淀积层下部(47~88 cm)靠近地下水, 水分含量较高, 氧气相对缺乏, 氧化作用和细菌的分解作用缓慢, 植物残体和有机质不能充分分解, 因而土壤有机质含量高于淀积层上部(25~47 cm)。

水田改林地后, 由于灌溉水减少, 人为滞水状况消失, 剖面中还原淋溶、氧化淀积作用明显减弱甚至消失, 林地中土壤表层和亚表层因还原淋溶而损失的全铁和游离氧化铁减少, 因而林地表层和亚表层土壤全铁和游离氧化铁含量比水田土壤中的含量高。水田改林地后, 由于土壤含水率和有机质含量下降, 对氧化铁结晶化抑制作用减弱, 土壤中大量活性铁脱水向

晶质铁转化，致使表层和亚表层活性铁含量下降，这与 Takahashi 等<sup>[3]</sup>的研究结果一致。水田改林地后，剖面中土壤 Fe(II) 含量下降，主要与氧化还原电位升高，大量 Fe(II) 在化学氧化和微生物的作用下被氧化为 Fe(III) 有关。

### 3.3 土壤生物学性质演变特征及机理

水田改林地后由于土壤含水率、有机质下降，微生物生长必需的水分和营养物质减少；土壤结构体变大、硬化，土壤孔隙度下降，对微生物生长微环境带来负面影响，不利于微生物生长与繁殖，引起表层土壤微生物 PLFAs 总量及多数微生物含量下降，这与杨东伟等<sup>[20]</sup>的研究结果基本一致。在淹水植稻条件下，表层土壤主要处于厌氧还原状态；水田改林地后土壤通气性改善，更适宜于好氧细菌、放线菌和原生动物生存，因而好氧细菌/厌氧细菌比值、放线菌/细菌比值以及原生动物/细菌比值均增加，革兰氏阴性细菌/革兰氏阳性细菌比值降低。水田改林地前期由于土壤通气性改善，真菌与细菌比值增加；而后期随着土壤养分含量下降，真菌与细菌比值又呈现下降趋势。

## 4 结论

农旅融合背景下，大面积水田转换为休闲农业和乡村旅游发展用地，土地利用方式改变后土壤发生层形态结构、微形态特征、理化性质和微生物特性均发生明显变化。水田改林地后，人为滞水状况消失，土壤干湿交替的水分状况不再明显，土壤自然含水量明显下降，土壤结构体体积、坚实度和容重增大，亮度和彩度增加，孔隙度下降；表层土壤 pH、有机质含量下降，表层土壤全铁和游离铁含量增加，活性铁和亚铁含量明显下降。土壤微生物群落结构发生变化，好氧细菌/厌氧细菌比值和原生动物/细菌比值均增加，革兰氏阴性细菌/革兰氏阳性细菌比值降低。总之，农旅融合背景下水田改林地对土壤生态环境带来显著影响，引起土壤酸化、硬化、结构变差、固碳能力减弱，引起土壤微生物总量下降，对植被生长带来负面影响，不利于土壤的可持续利用。本研究同时表明，监测土壤性状及微生物学特征是评价土地利用变化影响效应及土壤可持续利用的一种有效方式。

## 参考文献：

- [1] 邹宏玉, 何方永. 生态环境建设与乡村旅游之间的动态关系研究[J]. 农业经济, 2020(11): 49–51.

- [2] 林秀治, 黄秀娟. 基于循环经济理论的休闲农业旅游生态环境管理研究[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(22): 128–129.
- [3] Takahashil T, Park C Y, Nakajima H, et al. Ferric iron transformation in soils with rotation of irrigated rice-upland crops and effect on soil tillage properties[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1999, 45(1): 163–173.
- [4] 林兰稳, 余炜敏, 钟继洪, 等. 珠江三角洲水改旱蔬菜地土壤特性演变[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 154–158.
- [5] 李辉信, 胡锋, 蔡贵信, 等. 水田、旱坡地改种蔬菜后土壤养分含量的变化[J]. 土壤, 2004, 36(6): 678–681.
- [6] 张华勇, 尹睿, 黄锦法, 等. 稻麦轮作田改为菜地后生化指标的变化[J]. 土壤, 2005, 37(2): 182–186.
- [7] 浙江省绍兴市农业局. 绍兴市土壤[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1991: 119–121.
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 12–246.
- [9] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1–243.
- [10] Wu Y P, Ding N, Wang G, et al. Effects of different soil weights, storage times and extraction methods on soil phospholipid fatty acid analyses[J]. Geoderma, 2009, 150(1/2): 171–178.
- [11] Sah R N, Mikkelsen D S, Hafez A A. Phosphorus behavior in flooded-drained soils. II. Iron transformation and phosphorus sorption[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(6): 1723–1729.
- [12] Frostegård A, Bååth E. The use of phospholipid fatty acid analysis to estimate bacterial and fungal biomass in soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 1996, 22(1): 59–65.
- [13] 钟文辉, 蔡祖聪. 土壤微生物多样性研究方法[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 899–904.
- [14] 陈振翔, 于鑫, 夏明芳, 等. 磷脂脂肪酸分析方法在微生物生态学中的应用[J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 828–832.
- [15] McKinley V L, Peacock A D, White D C. Microbial community PLFA and PHB responses to ecosystem restoration in tallgrass prairie soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(10): 1946–1958.
- [16] 颜慧, 蔡祖聪, 钟文辉. 磷脂脂肪酸分析方法及其在土壤微生物多样性研究中的应用[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 851–859.
- [17] Liang C, da Jesus E C, Duncan D S, et al. Soil microbial communities under model biofuel cropping systems in southern Wisconsin, USA: Impact of crop species and soil properties[J]. Applied Soil Ecology, 2012, 54: 24–31.
- [18] 方利平, 章明奎. 利用方式改变对水稻土发生学特性的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 815–816.
- [19] 章明奎, 杨东伟. 南方丘陵地水改旱后土壤发生学性质与类型的变化[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 786–792.
- [20] 杨东伟, 章明奎, 张鹏启, 等. 水田改果园后土壤微生物学特性演变[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 182–193.