

杨东伟, 章明奎, 张鹏启, 等. 水田改果园后土壤形态及性状的演变[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1184–1192.

YANG Dong-wei, ZHANG Ming-kui, ZHANG Peng-qi, et al. Evolution of soil morphology and properties after land-use change from paddy field to orchard farm[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6): 1184–1192.

# 水田改果园后土壤形态及性状的演变

杨东伟<sup>1,2,3</sup>, 章明奎<sup>1\*</sup>, 张鹏启<sup>2</sup>, 刘千千<sup>2</sup>, 李雪<sup>2</sup>, 黄笑<sup>2</sup>, 李丽琳<sup>2</sup>

(1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2. 河南师范大学旅游学院, 河南 新乡 453007; 3. 广西大学商学院, 南宁 530004)

**摘要:**近年来,水田改作经济林在中国南方地区非常普遍,为深入了解这一土地利用的转变对土壤质量的影响,选择浙江省杭州市由水田改果园时间系列的代表性土壤剖面,采集分层土壤样品,采用田间调查与室内分析相结合的方法对比分析了水田改果园后土壤形态及性质的变化。结果表明:水田改果园 20 年的土壤与长期植稻的水田土壤相比,地下水位下降了 20 cm,耕作层土壤容重增加了 28.0%,坚实度增加了 2.65 倍;耕作层和犁底层土壤颜色亮度和彩度增加,铁锈斑纹等新生体减少;耕作层土壤 pH 值降低,土壤有机质、全氮和碱解氮含量分别下降了 42.1%、40.3%和 37.4%,土壤全磷、有效磷和速效钾含量分别增加了 1.35、15.62 倍和 3.07 倍;耕作层土壤微生物生物量碳和生物量氮分别减少了 76.5%和 52.1%;好氧细菌与厌氧细菌比值增加了 97.0%,革兰氏阴性细菌与革兰氏阳性细菌比值降低了 24.6%。研究表明,水田改果园后,土壤形态和性状发生显著变化,并对土壤生态环境带来显著影响。

**关键词:**水田;果园;土地利用方式;土壤性状;磷脂脂肪酸

中图分类号:S152 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)06-1184-09 doi:10.11654/jaes.2017-1446

## Evolution of soil morphology and properties after land-use change from paddy field to orchard farm

YANG Dong-wei<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Ming-kui<sup>1\*</sup>, ZHANG Peng-qi<sup>2</sup>, LIU Qian-qian<sup>2</sup>, LI Xue<sup>2</sup>, HUANG Xiao<sup>2</sup>, LI Li-lin<sup>2</sup>

(1. College of Environment and Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. College of Tourism, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 3. Business College, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** In recent years, land-use change from paddy field to economic forest has been very common in Southern China. To understand the effects of such change on soil quality, we selected a series of soils of paddy fields and orchard farms, collected from different layers of the soil profiles in Hangzhou City, Zhejiang Province, and compared morphology characteristics and properties of the paddy and orchard soils, using a combination of field investigations and laboratory analyses. After reclamation for 20 years, compared with paddy fields the groundwater level of orchard farms had fallen by 20 cm; moreover, soil bulk density and the hardness of the plow layer had increased by 28.0% and 2.65 times, respectively. The brightness and chroma of the colors of the plow layer and plough pan soils had increased, whereas rust spots were reduced. Soil pH had declined, and soil organic matter, total nitrogen, and alkali-hydrolysable nitrogen had decreased by 42.1%, 40.3%, and 37.4%, respectively, in plow layer. Although effective phosphorus and total potassium in the plow layer soils showed an increasing trend, soil microbial biomass carbon and nitrogen were in contrast decreased by 76.5% and 52.1%, respectively. The ratio of aerobic bacteria to anaerobic bacteria had increased by 97.0%, whereas that of gram-negative to gram-positive bacteria had decreased by 24.6%, and changes in the soil microbial community structure had occurred. The results indicate that after the reclamation of paddy into orchard farm, soil morphology and properties have undergone significant changes, and these have significant influences on the soil ecological environment.

**Keywords:** paddy field; orchard; land use; soil morphology; phospholipid fatty acid (PLFA)

收稿日期: 2017-10-24 录用日期: 2018-01-10

作者简介: 杨东伟(1980—),男,河南商丘人,博士,从事土壤资源、土地利用与生态环境研究。E-mail: yangdongwei20062006@126.com

\*通信作者: 章明奎 E-mail: mkzhang@zju.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571207); 河南师范大学博士启动课题基金项目(qd15152); 河南师范大学青年科学基金项目(2016QK33)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41571207); The Doctoral Foundation of Henan Normal University(qd15152); The Science Foundation for Young Scholars of Henan Normal University(2016QK33)

水田是承载着中华文明的人工湿地生态系统,是在长期水耕熟化过程中,在频繁的人为管理措施影响下形成的。近年来,随着经济发展和产业结构调整,中国南方许多地区的水田不再种植水稻而改种果树、苗圃等经济林木。1997年浙江省水稻播种面积为208.6万 $\text{hm}^2$ ,由于水田改种其他作物或用作其他用途,1997—2011年间浙江省水稻种植面积减少了89.6万 $\text{hm}^2$ (数据来源于《浙江统计年鉴》)。水田利用方式的改变可对农田水分管理、养分管理和耕作方式带来显著影响,引起土壤物质循环、转化与迁移的变化,并影响其周围的生态环境。水田改果园后,促进土壤水耕熟化的人为滞水条件不复存在,土体的氧化还原环境也随之发生变化,土体由还原过程占优势向氧化过程为主过渡,由此引起土壤形态和性状的变化。以往一些学者对水田改为其他利用方式后土壤基本性质的演变进行了研究,结果表明水田改旱作后土壤pH值、有机质、微生物生物量碳氮及活性下降<sup>[1-5]</sup>,而关于水田改为果园后土壤形态特征以及微生物群落结构演变的研究却鲜有报道。本文以浙江省杭嘉湖平原为研究区,选择并构建一个水田改果园土壤剖面系列,采用时空互代法,探讨水田改果园后土壤剖面形态学特征、土壤理化和微生物学性质的演变规律及其对生态环境带来的影响,希望在维护土壤生态功能、防止土壤退化和实现土壤可持续利用方面提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

采样地点为杭州市余杭区瓶窑镇窑北村(地理坐标见表1),地处杭嘉湖平原,属于中北亚热带季风气候过渡带,多年平均降水量在1200~2000 mm之间,雨日150~190 d,成土母质为湖海相沉积物,平均海拔为4.8 m<sup>[6]</sup>。

### 1.2 土样采集

土壤剖面分层样品于2013年3月上旬采集。水田样品采集时,水稻已收获,田面落干。采集了3种不同土地利用历史的农地:水田、水田改果园8年和20年的农地。为减少采样误差,每块农地设置3个重复

剖面进行观察与采样,重复剖面之间相距5 m,构成一个等边三角形,将3个重复剖面对应发生层土壤混合成一个土样;所有剖面之间直线距离均不超过300 m。每个剖面的挖掘深度均不少于140 cm;依据土壤剖面发育状况确定发生层及其深度,分层采集土壤样品。为增强可比性,在采集土壤剖面样品时,做了一定技术处理,即3块农田中采集的9个土壤剖面的相似发生层取土深度尽可能保持一致。根据土壤剖面发育情况确定发生层深度,0~17 cm土层为耕作层,17~30 cm土层为犁底层,30~65 cm和65~85 cm土层为淀积层(氧化还原层),85~140 cm土层为脱潜层。依据第二次土壤普查资料,供试水田土壤在发生分类中属于水稻土土类,脱潜潜育型水稻土亚类,青粉泥田土属,青粉泥田土种<sup>[7]</sup>;在系统分类中属于铁聚人为土(采用统一编号TJ)。供试土壤黏粒含量在228~363  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。每年每公顷水田平均施尿素240 kg,过磷酸钙450 kg,氯化钾150 kg,以及复合肥225 kg;每公顷桃树林平均施用尿素3000 kg,过磷酸钙975 kg,氯化钾450 kg,复合肥1050 kg,鸡粪22 500 kg。供试果园施肥量明显高于水田,是水田改果园后土壤理化性质变化的重要因素。供试土壤其他信息详见表1。

田间采集的分层土样分为三部分:一部分带回实验室采用常规方法风干处理,先后过2、0.25 mm和0.15 mm土筛,用于土壤理化指标测定;另外两份置于塑料袋中,用冰块冷藏带回实验室,一部分放入4℃冰箱,一周内完成土壤微生物量测定,另一部分冷冻干燥后,放入-80℃冰箱用于测定土壤微生物磷脂脂肪酸含量。

### 1.3 数据测定和分析

土壤自然含水量、颜色、pH值、土壤颗粒组成、有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾等基本理化指标采用土壤标准测定方法进行,具体步骤见参考文献[7-8]。土壤微生物生物量碳、氮采用氯仿熏蒸- $\text{K}_2\text{SO}_4$ 浸提,TOC自动分析仪测定。

土壤微生物磷脂脂肪酸(PLFA)参照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<sup>[9]</sup>。采用一种或多种特

表1 土壤剖面基本信息

Table 1 Basic information of soil profiles

剖面号	土壤类型	改果园年限/a	纬度	经度	利用方式	植被
TJP <sub>1</sub>	青粉泥田	0	30°24'27"	119°56'24"	水田	单季稻
TJP <sub>2</sub>	改果园前为青粉泥田	8	30°24'26"	119°56'23"	果园	桃树
TJP <sub>3</sub>	改果园前为青粉泥田	20	30°24'24"	119°56'18"	果园	桃树

征脂肪酸之和表示土壤微生物的绝对含量和相对丰度。细菌的特征脂肪酸:12:00、i14:0、14:00、a15:0、15:00、i15:0、15:0 2OH、15:0 3OH、a16:0、16:1 $\omega$ 9c、16:1 $\omega$ 5c、16:00、16:0 Nalcohol、17:00、a17:0、cy17:0、18:00、18:1 $\omega$ 7c、18:1 $\omega$ 5c、17:0 ISO 3OH、i19:0 和 cy19:0 $\omega$ 8c<sup>[10-14]</sup>;真菌的特征脂肪酸:18:1 $\omega$ 9c、18:2 $\omega$ 6c、18:3 $\omega$ 6c(6,9,12)和 20:1 $\omega$ 9c;放线菌的特征脂肪酸:16:0(10Me)、17:0(10Me)、18:0(10Me)和 19:0(10Me);原生动物的特征脂肪酸:20:2 w6,9c 和 20:4 w6,9,12,15c;革兰氏阴性细菌的特征脂肪酸:16:1 $\omega$ 5c、17:1 $\omega$ 8c、18:1 $\omega$ 5c、18:1 $\omega$ 7c 和 cy17:0;革兰氏阳性细菌的特征脂肪酸:i14:0、a15:0、i15:0、a16:0、i16:0、a17:0、i17:0 和 a18:0;好氧细菌的特征脂肪酸:a15:0、i15:0、15:0、i16:0、a17:0、i17:0 和 17:0;厌氧细菌的特征脂肪酸:18:1 $\omega$ 7c<sup>[11-14]</sup>。

采用佳能相机(EOS M3)拍照,Microsoft Excel 2007 软件进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤形态

水田改果园后,土壤结构体类型发生变化,耕作层土壤由团块状(直径 10~30 mm)为主,转变为块状(长度 20~50 mm)为主;犁底层土壤由块状(长度 30~60 mm)为主,转变为大块状(长度>60 mm)为主(表 2)。改果园后,耕作层和犁底层根系和植物茎叶等残

体数量明显减少;根孔的连续性遭到破坏,其中犁底层土壤变化最明显(表 2)。

在水田耕作层和犁底层土壤中,锈色斑纹约占结构面的 30%;改果园后,随着种植桃树年限的增加,表层和亚表层土壤中锈色斑纹逐渐失去鲜亮色泽、淡化,甚至消失(图 1 和表 2),氧化还原层土壤中锰斑和结核明显增多,结核颜色明显加深(图 1)。

### 2.2 土壤物理性质

水田改为果园后,耕作层和犁底层土壤自然含水量降低,其他发生层自然含水量变化不明显(表 3)。水田中地下水位为 115 cm,在改果园 8 年和 20 年后地下水位分别下降至 125 cm 和 135 cm。

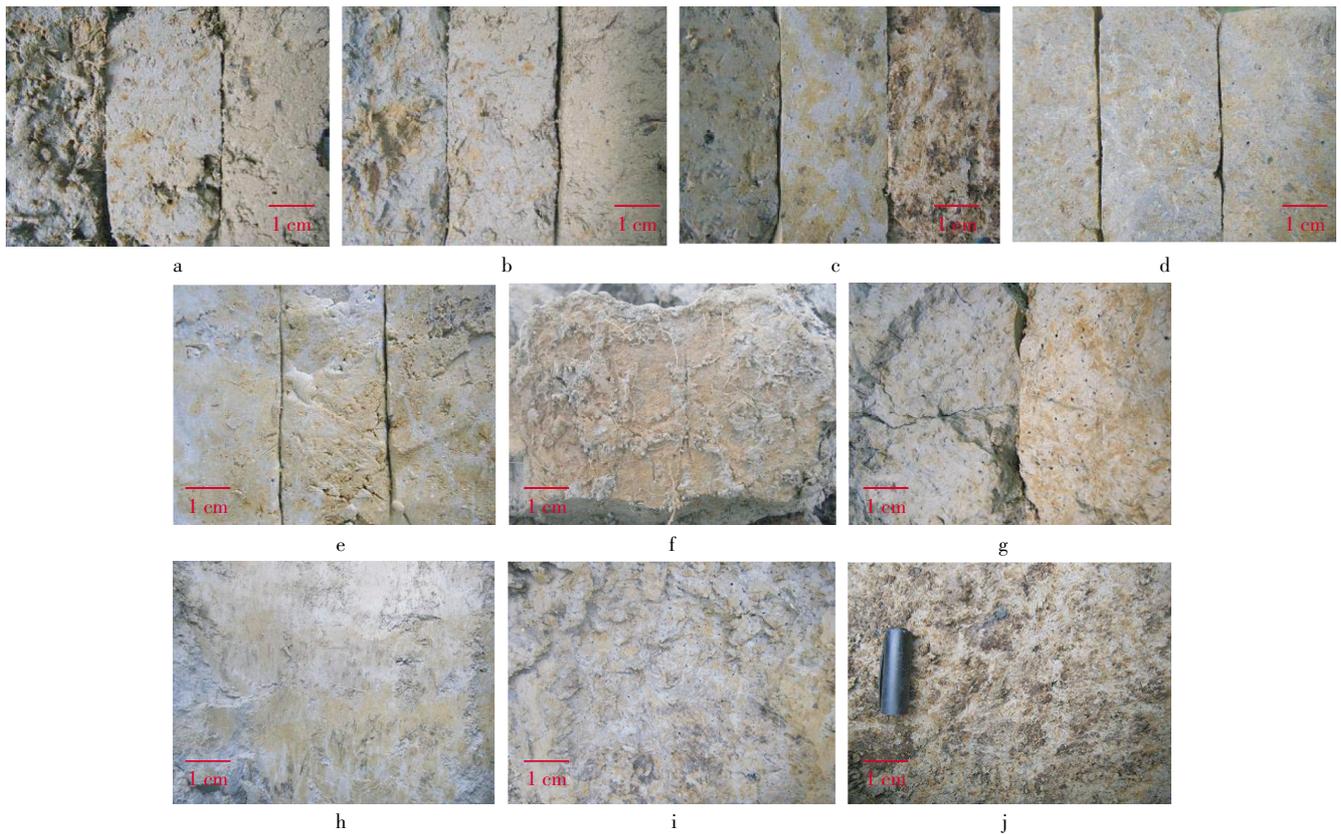
水田改果园后,剖面土壤基质的色值基本保持不变或有轻微变化,水田耕层土壤润态颜色为黄灰色(2.5Y4/1),改果园 8 年和 20 年后,土壤颜色转变为暗灰黄色(2.5Y5/2)和黄棕色(2.5Y5/3);此外,犁底层土壤明度和彩度增加,其他发生层土壤颜色变化不明显(图 1 和表 2)。改果园后,由于土壤有机质下降和农作活动下的人为踩踏等因素的影响,耕作层和犁底层土壤容重和坚实度增加,孔隙度下降(表 3)。

通过 X 射线衍射(X-ray diffraction analysis, XRD)技术对水田和果园亚表层土壤黏土矿物类型进行半定量鉴定,衍射图谱(图 2)是以衍射角(2 $\theta$ )为横坐标,以衍射谱线的衍射强度(与最高衍射峰比较的相对强度)为纵坐标的曲线。在镁-甘油饱和定向片衍

表 2 水田和果园土壤剖面形态特征

Table 2 Morphology characteristics of soil profiles in paddy fields and orchard farms

剖面号	发生层深度/cm	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
TJP <sub>1</sub>	0~17	团块状(10~30 mm 为主)	黄灰色(2.5Y4/1)	铁锈斑纹	30	2~5
	17~30	块状(30~60 mm 为主)	暗灰黄色(2.5Y4/2)	铁锈斑纹	28	2~5
	30~65	棱块状(50~110 mm 为主)	暗灰黄色(2.5Y5/2)	铁锰斑纹及结核	15	1~4
	65~85	棱块状(40~100 mm 为主)	黄棕色(2.5Y5/3)	铁锰斑纹	5	1~5
	85~140	块状(30~50 mm 为主)	黄灰色(2.5Y6/1)	铁锈斑纹	30	2~5
TJP <sub>2</sub>	0~17	块状(15~50 mm 为主)	暗灰黄色(2.5Y5/2)	铁锈斑纹	5	1~3
	17~30	大块状(>50 mm 为主)	暗灰黄色(2.5Y5/2)	铁锈斑纹	8	1~4
	30~65	大棱块状(70~130 mm 为主)	黄灰色(2.5Y6/1)	铁锰斑纹及结核	20	1~5
	65~85	大棱块状(60~120 mm 为主)	黄棕色(2.5Y5/3)	铁锰斑纹	7	2~5
	85~140	大块状(>50 mm 为主)	黄灰色(2.5Y6/1)	铁锈斑纹	5	1~3
TJP <sub>3</sub>	0~17	块状(20~50 mm 为主)	黄棕色(2.5Y5/3)	铁锈斑纹	0	—
	17~30	大块状(>60 mm 为主)	浊黄色(2.5Y6/3)	铁锈斑纹	5	1~2
	30~65	大棱块状(80~140 mm 为主)	灰黄色(2.5Y6/2)	铁锰斑纹及结核	40	3~8
	65~85	大棱块状(70~130 mm 为主)	黄棕色(2.5Y5/3)	铁锰斑纹	6	2~5
	85~140	大块状(>60 mm 为主)	黄灰色(2.5Y6/1)	铁锈斑纹	5	1~3



从左向右依次为水田、8年果园和20年果园的土壤耕作层(a)、犁底层(b)、淀积层上部(c)、淀积层下部(d)和脱潜层(e)斑纹及色彩对比照；水田犁底层铁锰胶膜(f)；水田和20年果园土壤淀积层上部根孔及色彩对比照(g)；水田(h)、改果园8年(i)和改果园20年(j)淀积层上部铁锰斑纹及结核形态对比

These pictures from the left to the right are paddy field, orchard farm 8 and 20 years old, plow layer(a), plough pan(b), upper redox layer(c), lower redox layer(d), gleyic layer(e); iron and manganese membrane in plough pan of paddy field(f); the comparison of root hole and color of upper redox layer in paddy field and 20 years old orchard farm(g); the speckle and core of iron and manganese in upper redox layer(h, i and j)

图1 水田和果园土壤剖面各发生层形态特征对比

Figure 1 Morphology characteristics of different layers of soil profiles in paddy fields and orchard farms

表3 水田和果园土壤基本理化性质

Table 3 Soil physicochemical properties in paddy fields and orchard farms

剖面号	发生层深度/cm	自然含水量/%	坚实度/kg·cm <sup>-3</sup>	容重/g·cm <sup>-3</sup>	孔隙度/%	pH	有机质/g·kg <sup>-1</sup>
TJP <sub>1</sub>	0~17	46.57	0.42	0.99	62.64	5.82	40.23
	17~30	29.92	8.78	1.53	42.26	5.71	27.00
	30~65	25.80	7.2	1.60	39.62	6.71	7.95
	65~85	29.76	7.2	1.58	40.38	7.00	7.23
	85~140	32.07	1.24	1.60	39.62	6.97	7.88
TJP <sub>2</sub>	0~17	28.48	3.11	1.25	52.83	5.63	30.63
	17~30	29.25	9.40	1.58	40.38	5.45	21.01
	30~65	27.86	16.12	1.61	39.25	6.66	7.93
	65~85	28.67	13.04	1.64	38.11	6.79	6.82
	85~140	29.19	1.37	1.61	39.25	6.76	7.23
TJP <sub>3</sub>	0~17	26.90	3.65	1.28	51.70	5.12	23.30
	17~30	28.36	10.65	1.63	38.49	5.05	15.64
	30~65	21.32	20.14	1.64	38.11	5.85	7.70
	65~85	28.67	16.12	1.66	37.36	6.34	6.85
	85~140	29.19	1.44	1.62	38.87	6.88	7.24

射图谱中,设这些矿物含量百分比之和为100%,将样品中各种特征衍射峰的积分面积乘以比例系数,分别求出各自的百分含量(表4)。结果表明,水田和果园中土壤亚表层黏土矿物以高岭石和伊利石为主,其次为绿泥石,此外石英含量也比较高。由于水改旱后自然含水量下降等因素的影响,耕作层土壤中绿泥石含量有轻微降低趋势,其他土壤黏土矿物类型及相对含量变化整体均不明显。

### 2.3 土壤化学性质

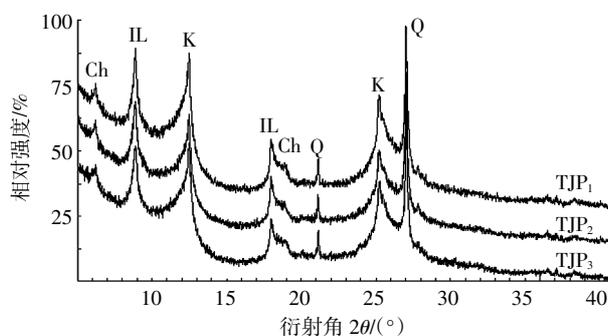
由表3可知,土壤剖面中有机质含量随着桃树种植时间的延长和土壤剖面深度的增加呈降低趋势:改果园8年后,耕作层和犁底层有机质分别下降了23.9%和22.2%;改果园20年后,耕作层和犁底层有机质都下降了42.1%,变异系数分别达到27.0%和

26.7%。改果园20年后,耕作层和犁底层土壤pH值分别下降12.0%和11.6%。耕作层土壤容重和坚实度分别增加了29.3%和7.69倍,变异系数分别达到13.7%和72.4%。改果园后,淀积层和脱潜层土壤理化性质变化不明显。

由表5可知,水田改果园8年后耕作层土壤中全氮和碱解氮含量分别下降22.5%和31.7%,改果园20年后分别下降40.3%和37.4%。由于化肥施用量增加等因素的影响,改果园20年后耕作层土壤中全磷、有效磷和速效钾含量分别增加了1.35、15.62倍和3.07倍。

### 2.4 土壤生物学性质

水田改果园后,土壤微生物生物量碳和生物量氮随着植树年限的延长而明显降低。在水田土壤中微生物生物量碳和生物量氮含量分别为 $965.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $71.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,改果园8年后分别下降了47.3%和18.9%,改果园20年后分别下降了76.5%和52.1%。PLFA生物标记法分析表明,水田改果园后耕层土壤微生物种类整体比较相似,而总PLFAs含量及各类微生物含量整体上呈下降趋势(表6、表7和图3)。对图3中含量较高、具有代表性的土壤微生物特征脂肪酸列表分析,结果表明(表6),代表好氧细菌的特征脂肪酸*i15:0*和*i16:0*的相对含量在改果园20年后,分别增加28.7%和45.1%,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81.8%和41.2%。由表7可知,土壤微生物群落结构发生显著变化,水田土壤中好氧细菌与厌氧细菌比值为2.97,改果园8年和20年后其比值分别增加了76.2%和97.0%。在水田土壤中华兰氏阴性细菌与革兰氏阳性细菌比值为0.557,改果园8年和20年后比值分别降低了22.2%和24.6%。此外,改果园20年后,真菌/细菌和放线菌/细菌分别下降34.5%和8.4%。



Q:石英,K:高岭石,Ch:绿泥石,IL:伊利石  
Q: Quartz, K: Kaolinite, Ch: Chlorite, IL: Illite

图2 水田和果园犁底层土壤黏土X射线衍射图谱

Figure 2 X-ray diffraction spectrogram of the clay minerals of subsurface soils in paddy fields and orchard farms

表4 水田和果园亚表层土壤中主要黏土矿物百分含量(%)

Table 4 The percentage of clay mineral of subsurface soils in paddy and orchard soils (%)

剖面号	高岭石	绿泥石	伊利石
TJP <sub>1</sub>	52.21	15.57	32.22
TJP <sub>2</sub>	54.24	15.86	29.90
TJP <sub>3</sub>	50.83	13.87	35.30

注:石英为原生物质残留,不属于黏土矿物,因而未计算在内。

Note: Quartz is the residue of original material, not belong to clay minerals, so it is not be calculated.

表5 水田和果园耕作层土壤养分

Table 5 Soil nutrients in plow layer soils of paddy fields and orchard farms

剖面号	发生层深度/cm	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
TJP <sub>1</sub>	0~17	2.53	194.3	0.52	18.64	14.40	57.62
TJP <sub>2</sub>	0~17	1.96	132.8	0.98	162.8	12.78	176.7
TJP <sub>3</sub>	0~17	1.51	121.7	1.22	309.8	12.95	234.6

## 3 讨论

### 3.1 水田改果园后土壤形态和性质的演变

水田改果园后,由于土壤有机质含量下降和氧化铁形态的变化,耕作层和犁底层土壤颜色亮度和彩度增加<sup>[8,15]</sup>(图1和表2)。改果园后,耕作层和犁底层土

表6 水田和果园耕作层土壤微生物 PLFAs 含量

Table 6 The content of soil microbial phospholipid fatty acid in plow layer of paddy fields and orchard farms

特征脂肪酸	位置/min	微生物类型	PLFAs 含量/nmol·g <sup>-1</sup>			百分含量/%		
			TJP <sub>1</sub>	TJP <sub>2</sub>	TJP <sub>3</sub>	TJP <sub>1</sub>	TJP <sub>2</sub>	TJP <sub>3</sub>
i15:0	8.552~8.554	好氧细菌	16.90	6.53	6.75	7.14	7.82	9.20
i16:0	10.206~10.211	好氧细菌	6.76	3.23	3.04	2.86	3.87	4.15
18:1 $\omega$ 7c	13.966~13.974	厌氧细菌	16.08	3.53	2.93	6.80	4.22	4.00
18:1 $\omega$ 9c	13.879~13.885	真菌	25.60	6.61	5.03	10.82	7.91	6.86
16:0 10Me	11.595~11.600	放线菌	19.52	5.18	5.21	8.25	6.20	7.11
18:0	14.370~14.373	嗜热解氢杆菌	14.95	4.40	3.26	6.32	5.27	4.44
16:0	10.840~10.847	细菌	30.24	11.55	10.90	12.78	13.83	14.87
19:0 cyc $\omega$ 8c	15.966~15.976	细菌	22.13	6.85	6.60	9.36	8.20	9.00

表7 耕层土壤中不同种类土壤微生物比例

Table 7 The ratios of different microbes in plow layer soils

剖面号	总 PLFAs/nmol·g <sup>-1</sup>	真菌/细菌	放线菌/细菌	原生动/细菌	革兰氏阴性细菌/革兰氏阳性细菌	好氧细菌/厌氧细菌
TJP <sub>1</sub>	236.55	0.200	0.203	0.020	0.557	2.97
TJP <sub>2</sub>	83.54	0.147	0.173	0.064	0.433	5.25
TJP <sub>3</sub>	73.32	0.131	0.186	0.031	0.420	5.85

壤中锈色斑纹逐渐失去鲜亮色泽、逐步淡化与破碎,最后与整个土体混合,这主要与土壤水分含量下降及土壤的翻耕有关。随着改果园年限的延长和地表灌溉水补给的减少,地下水位逐渐下降,这与方利平等<sup>[6]</sup>的研究结果一致。

本研究中水田改果园后,耕作层和犁底层土壤 pH 明显下降(表 3),主要原因有以下几个方面:土壤通透性改善,硝化作用增强,大量 Mn<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>等离子被氧化,这些过程释放出大量质子(H<sup>+</sup>)使土壤变酸<sup>[7]</sup>;氯化钾等酸性肥料施用量增加也会加速土壤的酸化;此外,改果园后垂直淋洗增强也会对耕作层土壤 pH 值产生影响<sup>[8]</sup>。在田间条件下,水稻土淹水后 pH 值趋于中性<sup>[9]</sup>;李艾芬等<sup>[17]</sup>通过对嘉兴市郊水田和改种葡萄树、桃树后的园地研究表明,园地田间测定 pH 值平均为 4.7,而相邻种稻的水田土壤 pH 值平均为 6.8;以上结论与王振平等<sup>[20]</sup>和杨东伟等<sup>[21]</sup>关于水田和林地中土壤 pH 差异的结论一致。水田改果园后,由于土壤通气性增强,土壤微生物对有机质的分解速度加快,土壤有机质的化学氧化加速,使土壤剖面有机质含量下降;此外,改果园后植物残体进入土壤的数量减少,也会引起土壤有机质含量降低。改果园后,土壤有机质含量的降低还引起土壤全氮和碱解氮含量的下降(表 5),这与李昌新等<sup>[22]</sup>关于水田和旱地土壤有机碳和全氮差异的结论一致。与潘霞等<sup>[23]</sup>的研究结果相似,水田改果园后由于化肥施用量增加,土壤有

效磷和速效钾含量明显增加。

水田土壤中较高的有机质和水分含量,有利于土壤微生物生长<sup>[24]</sup>。受水田改果园后土壤微生物的主要营养物质(水分、碳源和氮源)下降等因素的影响,土壤微生物生物量碳氮、土壤微生物总 PLFAs 和不同种类微生物 PLFAs 含量降低(图 3 和表 6),真菌与细菌比例下降(表 7)。改果园 20 年后,土壤微生物群落结构发生显著变化,由于土壤通气性改善,因而好氧细菌与厌氧细菌比例增加了 97.0%,原生动与细菌的比例略微增加(表 7)。

### 3.2 水田改果园带来的环境效应

水田改旱作引起温室气体排放量增加等一些系列环境问题。全球气候变化的主要原因是由于人类活动向大气中排放过量的 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 等温室气体而引起的。全球 1 m 深土层中有机碳含量约为植被碳含量的 3 倍、大气碳含量的 2 倍,每年因土地利用变化所释放的 CO<sub>2</sub> 约占全球 CO<sub>2</sub> 释放量的 25%,我国农业源占温室气体排放总量的 17%,因而土壤中的有机碳既是碳汇又是碳源<sup>[25-28]</sup>。李欣雨等<sup>[29]</sup>研究表明水田中土壤有机碳明显高于其他土地利用方式。在淹水植稻条件下,耕层土壤处于厌氧还原状态,水田改果园后,土壤氧化还原状况发生改变,大量的土壤有机碳被氧化,以 CO<sub>2</sub> 的形式释放到大气中,增加了温室气体 CO<sub>2</sub> 的排放。

有研究表明,水田改玉米地后表层土壤(0~15 cm)

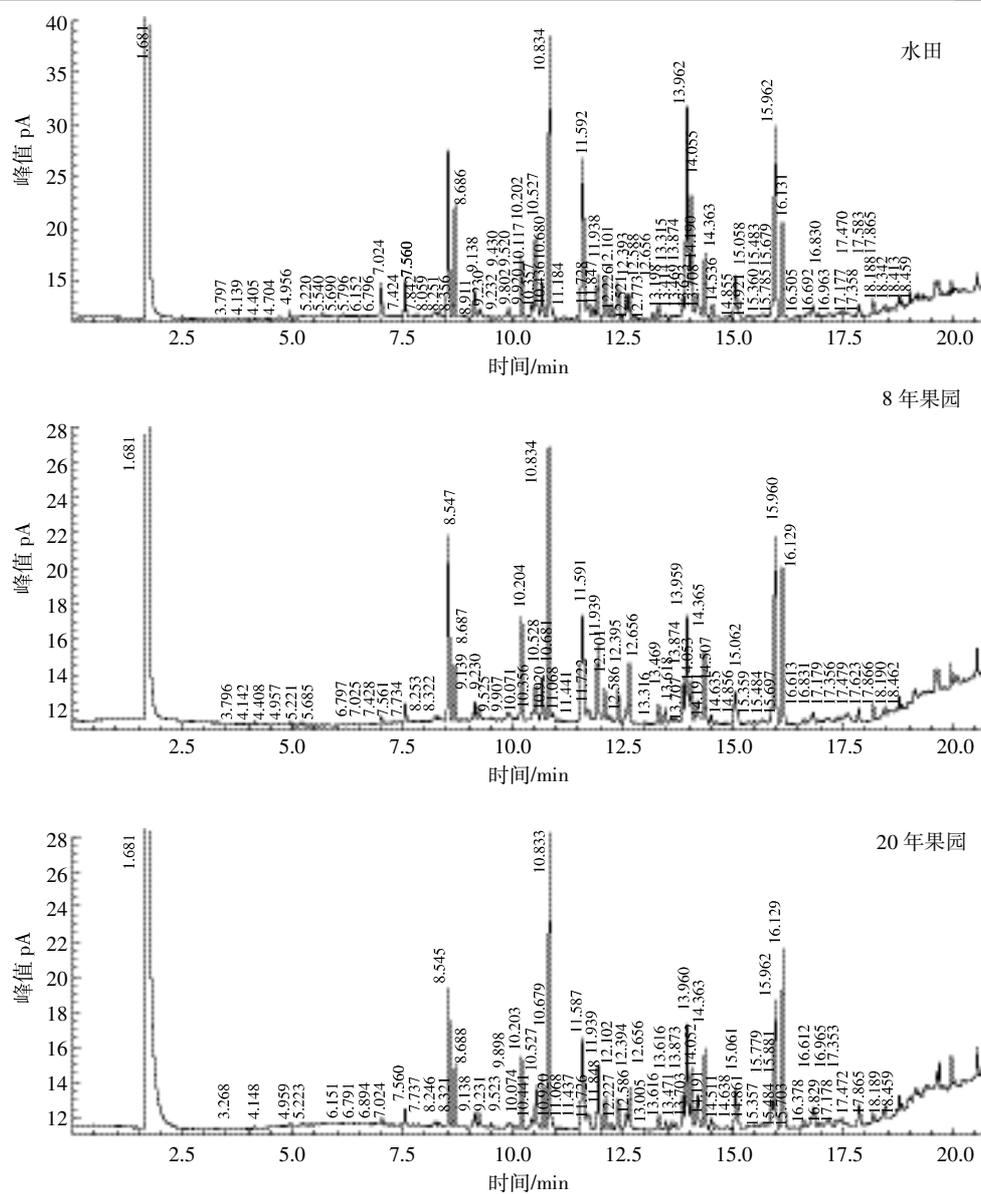


图3 土壤微生物 PLFAs 图谱

Figure 3 Atlas of soil microbial phospholipid fatty acids

有机碳损失率为  $1.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [30]。依据单正军等[31]和中国科学院南京土壤研究所土壤分类课题组等[32]相关方法估算温室气体排放,根据土壤有机碳的剖面分布特征,分层计算土壤有机碳损失量的计算公式为:

$$C = 0.58 \times H \times B \times O$$

式中:0.58 为土壤有机碳与土壤有机质的转换系数;  $C$  为土壤有机碳密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $H$  为土层厚度,  $\text{m}$ ;  $B$  为土壤容重,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $O$  为有机质含量,  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表3)。依据上述计算方法,将各土层有机碳相加,即为一定深度土壤中有有机碳总量。水田和20年果园土壤1 m以内土体有机碳总量的差值,即为土地利用方式变化后1

m以内土体固定有机碳的减少量;计算结果显示本研究中水田改桃园20年后,1 m内土体固碳量减少  $2.28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  ( $22.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。

水田在渍水嫌气条件下,土壤有机态氮的矿化过程主要停留在氨化阶段,以铵态氮形态积累,水田改果园后土壤硝化作用增强,  $\text{NH}_4^+$  由于被消耗而下降,该过程释放出  $\text{NO}$  和  $\text{N}_2\text{O}$ ,造成氮素的损失,反应过程如下:  $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NH}_2\text{OH} \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{N}_2\text{O}$ 。水田改果园后土壤有机质矿化释放的大量氮素,随水土流失或进入大气,引起有机氮含量的下降,最终引起土壤全氮含量和供氮能力的降低[33],并对大气和水体造

成重要影响。

#### 4 结论

(1)水田改果园后,土壤含水量、有机质、全氮、碱解氮及微生物生物量碳氮等土壤理化指标和生物学指标随着植树年限的延长而显著降低,并引起土壤酸化、土壤结构变差、碳汇作用减弱、土壤综合肥力下降,从而对土壤的健康发展和可持续利用产生不利影响。

(2)土壤微生物群落结构不仅受土壤环境因子变化影响,而且能够对土壤环境产生重要影响。供试土壤环境因子的改变是引起土壤微生物群落结构变化的主要原因。水田改果园后,土壤微生物磷脂脂肪酸总量和各类土壤微生物数量减少,微生物群落结构发生显著改变,土壤生态功能减弱。

(3)水田改果园后,土壤形态、肥力及微生物特性发生显著变化,土壤生态环境发生改变,并对周边水体和大气环境造成一定影响。

#### 参考文献:

- [1] Takahashi 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.
- [2] 尹睿,张华勇,黄锦法,等.保护地菜田与稻麦轮作田土壤微生物学特征的比较[J].植物营养与肥料,2004,10(1):57-62.
- YIN Rui, ZHANG Hua-yong, HUANG Jin-fa, et al. Comparison of microbiological properties between soils of rice-wheat rotation and vegetable cultivation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(1):57-62.
- [3] 张健,陈凤,濮励杰,等.经济快速增长区土地利用变化对土壤质量影响研究[J].环境科学研究,2007,20(5):99-104.
- ZHANG Jian, CHEN Feng, PU Li-jie, et al. The land use changes and its effects on the soil properties in the rapid developed region[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(5):99-104.
- [4] 王晋,庄舜尧,朱兆良.不同种植年限水田与旱地土壤有机氮组分变化[J].土壤学报,2014,51(2):286-294.
- WANG Jin, ZHUANG Shun-yao, ZHU Zhao-liang. Fractions of soil organic nitrogen in paddy and upland soils relative to cropping history[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2):286-294.
- [5] 孔樟良,季淑枫,章明奎,等.水田长期改种蔬菜土壤化学性状变化特征[J].中国农学通报,2015,31(23):147-152.
- KONG Zhang-liang, JI Shu-feng, ZHANG Ming-kui, et al. Vegetable crop plantation induced changes in chemical characteristics of paddy soils[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(23):147-152.
- [6] 杭州市土壤普查办公室.杭州土壤[M].杭州:浙江科学技术出版社,1991:9-10.
- Hangzhou Soil Survey Office. Hangzhou soils[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 1991:9-10.
- [7] 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.
- LU Ru-kun. Analysis methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science Press, 2000.
- [8] 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.
- ZHANG Gan-lin, GONG Zi-tong. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [9] 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.
- [10] Frostegård Å, 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(1/2):59-65.
- [11] 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].生态学报,2005,24(7):828-832.
- CHEN Zhen-xiang, YU Xin, XIA Ming-fang, et al. Application of phospholipid fatty acid (PLFA) analysis in microbial ecology[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(7):828-832.
- [12] McKinley V L, Peacockb 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.
- [13] 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.
- YAN Hui, CAI Zu-cong, ZHONG Wen-hui. PLFA analysis and its applications in the study of soil microbial diversity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5):851-859.
- [14] Liang C, Dajesus 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.
- [15] 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.
- ZHANG Ming-kui, YANG Dong-wei. Changes in genetic characteristics and types of soils in hilly regions after alteration from paddy fields to upland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(4):786-792.
- [16] 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.
- FANG Li-ping, ZHANG Ming-kui. Effects of land use on genetic properties of paddy soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4):815-816.
- [17] 李艾芬,范文俊,陆建中,等.浙江省嘉兴市郊水稻土酸度比较研究[J].土壤,2010,42(4):644-647.
- LI Ai-fen, FAN Wen-jun, LU Jian-zhong, et al. Comparison between paddy soil acidity in suburbs of Jiaxing City, Zhejiang Province[J]. *Soils*, 2010, 42(4):644-647.
- [18] 章明奎,唐红娟,常跃畅.黄斑田(铁聚水耕人为土)返旱后土壤发生学性质的变化[C]//中国土壤学会.面向未来的土壤科学.成都:电子科技大学出版社,2012:349-354.
- ZHANG Ming-kui, TANG Hong-juan, CHANG Yue-chang. Changes

- in genetic characteristics of Fe-accumuli-stagnic anthrosols transformed into upland from paddy fields[C]//China Association for Soil. Face the Future of Soil Science. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press, 2012: 349-354.
- [19] 于天仁. 水稻土的物理化学[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 173-205.  
YU Tian-ren. Physics and chemistry of paddy soil[M]. Beijing: Science Press, 1983: 173-205.
- [20] 王振平, 余辉, 汪怀建, 等. 大港河小流域土地利用方式对土壤肥力影响的研究[J]. 江西农业大学学报, 2011, 33(5): 1017-1022.  
WANG Zhen-ping, YU Hui, WANG Huai-jian, et al. Effects of land use types on soil fertility in Dagang watershed[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2011, 33(5): 1017-1022.
- [21] 杨东伟, 徐秋桐, 章明奎. 水田改雷竹林后土壤发生学性质和土壤类型的演变[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 777-782.  
YANG Dong-wei, XU Qiu-tong, ZHANG Ming-kui. Evolution of genetic characteristics and types of soils transformed into Lei Bamboo forest from paddy fields[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(4): 777-782.
- [22] 李昌新, 黄山, 彭现宪, 等. 南方红壤稻田与旱地土壤有机碳及其组分的特征差异[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 188-193.  
LI Chang-xin, HUANG Shan, PENG Xian-xian, et al. Differences in soil organic carbon fractions between paddy field and upland field in red soil region of South China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3): 188-193.
- [23] 潘霞, 陈励科, 吴龙华, 等. 水稻生产改为蔬菜或葡萄栽培对土壤养分的影响研究: 以浙江富阳为例[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2206-2213.  
PAN Xia, CHEN Li-ke, WU Long-hua, et al. Responses of soil nutrients to land use changes from rice production to vegetable cultivation or viticulture: A case study in Fuyang City, Zhejiang Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11): 2206-2213.
- [24] 李斌, 辜翔, 方晰, 等. 湘中丘陵区土壤微生物指标对土地利用方式的响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(4): 72-77.  
LI Bin, GU Xiang, FANG Xi, et al. Responses of soil microbial indicators to land-use types in hilly area, central Hunan Province[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2015, 35(4): 72-77.
- [25] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 609-618.  
PAN GEN-xing, LI Lian-qing, ZHANG Xu-hui, et al. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4): 609-618.
- [26] 张国盛, 黄高宝, YIN Chan. 农田土壤有机碳固定潜力研究进展[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 351-357.  
ZHANG Guo-sheng, HUANG Gao-bao, YIN Chan. Soil organic carbon sequestration potential in cropland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2): 351-357.
- [27] 毛艳玲, 杨玉盛, 邹双全, 等. 土地利用变化对亚热带山地红壤团聚体有机碳的影响[J]. 山地学报, 2007, 25(6): 706-713.  
MAO Yan-ling, YANG Yu-sheng, ZOU Shuang-quan, et al. Effects of land use on soil organic carbon in aggregates of hilly red soil in subtropical China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(6): 706-713.
- [28] 邓万刚, 吴蔚东, 陈明智, 等. 土地利用方式及母质对土壤有机碳的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1130-1134.  
DENG Wan-gang, WU Wei-dong, CHEN Ming-zhi, et al. Effects of land use change and soil parent material on soil organic carbon[J]. *Ecology & Environment*, 2008, 17(3): 1130-1134.
- [29] 李欣雨, 夏建国, 鄢广奎, 等. 名山河流域不同土壤类型和土地利用方式下有机碳的分布特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 224-230.  
LI Xin-yu, XIA Jian-guo, YAN Guang-kui, et al. Distribution of organic carbon under different soil types and utilization patterns in Mingshan River watershed[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2017, 31(3): 224-230.
- [30] 李志鹏, 潘根兴, 张旭辉. 改种玉米连续3年后稻田土壤有机碳分布和<sup>13</sup>C自然丰度变化[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 244-251.  
LI Zhi-peng, PAN Gen-xing, ZHANG Xu-hui. Topsoil organic carbon pool and <sup>13</sup>C natural abundance changes from a paddy after 3 years corn cultivation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 244-251.
- [31] 单正军, 蔡道基, 任阵海. 土壤有机质矿化与温室气体释放初探[J]. 环境科学学报, 1996, 16(2): 150-154.  
SHAN Zheng-jun, CAI Dao-ji, REN Zhen-hai. A preliminary assessment of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission from soils in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1996, 16(2): 150-154.
- [32] 中国科学院南京土壤研究所土壤分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索[M]. 三版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.  
Chinese Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, Academia Sinica, Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. Key to Chinese soil taxonomy[M]. 3rd edition. Hefei: University of Science & Technology China Press, 2001.
- [33] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊. 土地利用对土壤性质影响的区域差异研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8): 1697-1702.  
WU Wen-bin, YANG Peng, TANG Hua-jun. Regional variability of effects of land use system on soil properties[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(8): 1697-1702.