

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.03.021

杨东伟, 章明奎, 张鹏启, 等. 平原区水田改林地后土壤黏土矿物及氧化铁的变化. 土壤, 2020, 52(3): 567–574.

平原区水田改林地后土壤黏土矿物及氧化铁的变化^①

杨东伟^{1,2,3}, 章明奎^{1*}, 张鹏启², 刘千千², 董静², 李雪², 黄笑²

(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: 近年来水田改为林地在我国南方地区非常普遍, 为了解这种转变对土壤矿物(黏土矿物和氧化铁)演变的影响, 在浙江省平原地区构建了4个水田改林地系列土壤, 采用野外调查和室内分析相结合的方法, 研究水田改林地后土壤剖面中氧化铁形态和黏土矿物类型的演变规律。结果表明, 改林地后, 土壤剖面中全铁含量变化不明显, 耕作层和犁底层土壤游离氧化铁有轻微增加趋势。改林地15~20 a后, 4个系列土壤耕作层活性铁和活化度降幅分别在18.0%~38.4%和24.7%~48.9%; 耕作层土壤铁氧化物的晶胶比增幅在0.73倍~1.62倍; 耕作层土壤亚铁含量明显下降, 降幅最高达95.8%, 变异系数达到143.9%; 耕作层络合铁降幅在21.3%~36.2%, 并与有机质呈极显著正相关($P<0.01$)。改林地后, 犁底层土壤中绿泥石相对含量及其与高岭石的比值都呈降低趋势, 其他黏土矿物相对含量变化规律不明显, 土壤有机质显著下降, 土壤明显酸化。土壤铁氧化物形态和数量的变化对土壤结构以及土壤重金属的迁移转化等产生重要影响。

关键词: 水田; 林地; 氧化铁; 形态; 环境效应

中图分类号: S152.1 **文献标志码:** A

Changes of Soil Clay Minerals and Iron Oxides After Paddy Field Converted into Forest Land in Plain Areas

YANG Dongwei^{1,2,3}, ZHANG Mingkui^{1*}, ZHANG Pengqi², LIU Qianqian², DONG Jing², LI Xue², HUANG Xiao²

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

Abstract: Paddy field converted into forest land is very common in southern China in recent years. In order to understand the effects of this change on soil minerals (soil clay minerals and iron oxides), A series of paddy and forest soils in Zhejiang Province were selected, and the evolution of the morphology and quantity of iron oxides were studied by using a combination of field investigation and laboratory analysis. The results showed that the morphology and spatial distribution of soil iron oxides changed significantly after land-use change. The content of total iron did not change significantly; free iron in the surface and subsurface soils increased slightly, other layers changed insignificantly; after planting trees for 15 – 20 a, amorphous iron in 4 soil series fell down between 18.0% – 38.4% and 24.7% – 48.9%; the ratio of crystal to colloid of iron oxides in surface soil increased by 0.73 to 1.62 times; soil ferrous iron decreased significantly, which was up to 95.8% at most; complex iron fell down between 21.3% and 36.2%, and significantly correlated with organic matter ($P<0.01$). The relative content of chlorite and the ratio of chlorite to kaolinite in subsurface soil decreased, while the changes of other clay minerals were unobvious. Soil organic matter decreased significantly, soil was acidified obviously after the conversion, the morphology of soil iron oxides changed obviously. The change of the morphology and quantity of soil iron oxides had important effects on soil structure, the migration and transformation of soil heavy metals.

Key words: Water network plain; Paddy field; Forest land; Iron oxide; Morphology

水稻土是在周期性灌水淹育和排水疏干等人为活动影响下经过长期水耕熟化形成的。在氧化还原过

①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)和河南省社科联项目(SKL-2017-3689)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, 主要从事土地利用与生态环境方面研究。E-mail: yangdongwei20062006@126.com

程不断交替下,淹水时元素的还原淋溶、排水氧化淀积并重新分布于土壤剖面以及水耕黏闭等特有的过程^[1-3],对水稻土剖面发生层的形成以及一系列理化性质的变化起着极其深刻的、与旱作土壤迥然不同的影响。水稻土氧化还原状况的周期性交替及还原过程占优势的特点,是其与自然土壤和旱作土壤的最本质区别^[4]。黏土矿物种类和含量受气候、地形、植被、基岩类型等综合因素制约,是常用的示踪标记物,可以反映土壤成土环境、相应的成土作用过程及土壤发生机制。黏土矿物组合的变化反映了气候冷、暖周期性旋回,记录了搬运、再沉积和环境演化的重要信息,因此黏土矿物在物质来源及运移、沉积环境等研究中具有重要意义^[5]。氧化铁是土壤物质的重要组分,是土壤中性质较为活泼的变价元素,在氧化还原条件波动的情况下,铁可因得失电子而淋溶或淀积。土壤中氧化铁的氧化还原作用是水稻土形成过程中重要的化学过程,其在水稻土剖面的发生和特征层的形成中起着重要的作用^[4, 6]。土壤中铁氧化物可以多种形态存在,它们之间的相互转化可归纳为两个相反的过程,即老化和活化,前者沿着“离子态-非晶质态-弱晶质态-晶质态”的方向转化,后者沿着前者相反的方向转化。土壤氧化铁形态的转化与温度、水分、pH、Eh、有机质等环境条件有关^[7]。

近 30 a 来,我国南方地区有大面积水田被改为

林地、苗木地等旱作方式。改旱后,促进土壤水耕熟化的人为滞水条件不复存在,土壤剖面的氧化还原环境随之发生了明显的变化,土壤剖面形态和发生学特性也相应地发生改变。以往的研究中已注意到水田改旱后土壤形态及游离铁、活性铁含量的变化^[8-9],但对改旱后土壤氧化铁和黏土矿物动态演变规律的研究较少。为此,本研究在浙江省水网平原地区选择并构建 4 个改林地土壤剖面系列,采用时空互代法,研究了水田改林地后土壤剖面中氧化铁分布和黏土矿物的变化。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

在浙江省范围内选择并构建了 4 个水田改林地的不同年限土壤系列,共 12 个土壤剖面,分别采自 12 个独立的田块。每个系列包含一个长期种植水稻的土壤剖面 and 2 个改林地不同年限的土壤剖面(表 1)。4 个系列的土壤类型分别为腐心青紫泥田、青紫泥田、青粉泥田和小粉泥田(分别用 QYP, TSP, TJP 和 JYP 表示),属于水稻土土类,其中 QYP、TSP、TJP 属于脱潜水稻土亚类^[10-11]; JYP 属渗育水稻土亚类^[12]。土壤母质为湖沼相淤积物、湖海相沉积物或河海相沉积物。4 个系列土壤地形均为平原,海拔为 2.7 ~ 5.2 m。

表 1 土壤剖面样品基本信息
Table 1 Basic information of studied soil profiles

剖面系列	地点	剖面号	地理位置	植树年限(a)	利用方式	植被
腐心青紫泥田 改林地系列	嘉兴市南湖区大桥镇江南村	QYP ₁	30°44'50"N、120°51'47"E	0	水田	单季稻
		QYP ₂	30°44'52"N、120°52'9"E	7	果园	葡萄树
		QYP ₃	30°45'1"N、120°51'56"E	15		
青紫泥田改林地系列	绍兴市柯桥区福全镇赵家畈村	TSP ₁	29°58'27"N、120°30'2"E	0	水田	单季稻
		TSP ₂	29°58'28"N、120°30'1"E	12	林地	香樟树
		TSP ₃	29°58'27"N、120°30'0"E	19		
青粉泥田改林地系列	杭州市余杭区瓶窑镇窑北村	TJP ₁	30°24'27"N、 119°56'24"E	0	水田	单季稻
		TJP ₂	30°24'26"N、 119°56'23"E	8	果园	桃树
		TJP ₃	30°24'24"N、 119°56'18"E	20		
小粉泥田改林地系列	杭州市萧山区新塘街道霞江村	JYP ₁	30°8'43"N、120°19'26"E	0	水田	双季稻
		JYP ₂	30°8'42"N、120°19'22"E	8	林地	香樟树
		JYP ₃	30°8'30"N、120°19'26"E	15		

根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，样品在采集时，同一系列的土壤剖面样品空间距离尽量靠近，原则上同一系列的任意 2 个剖面直线距离不超过 400 m。在采集改林地的土壤剖面分层样品时，做一定技术处理，即同一系列不同剖面相似发生层取土深度尽可能保持一致。田间采集的分层土样分为两部分，一部分带回实验室采用常规方法风干处理，分别过 2 mm、0.25 mm 和 0.15 mm 土筛，用于土壤理化指标测定；另一份置于塑料袋中，用冰块冷藏带回实验室，尽快提取亚铁，同时用烘干法测定含水率，矫正分析结果。

1.2 研究方法

研究的分析内容包括土壤 pH、有机质、黏土矿物组成和不同氧化铁形态等。分析方法如下：含水量采用烘干法测定；pH 测定采用电位法(土液比 1:2.5 水浸提)；有机质采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定；全量铁采用 HF-HClO₄-HNO₃ 消化，游离态铁采取 DCB(即连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠)法提取，无定形态铁采用草酸铵-草酸缓冲液(pH=3.2)提取，络合态铁采用焦磷酸钠溶液提取，亚铁采用 Al₂(SO₄)₃ 溶液提取，采用邻菲罗啉比色法测定。黏土矿物组成：去除土壤中的有机质和游离铁后，用沉降-虹吸法提取 < 2 μm 的黏粒组分，用 MgCl₂ 和甘油饱和，制成定向片，X 射线衍射仪测定。以上指标详细测定步骤参见文献[13-14]。

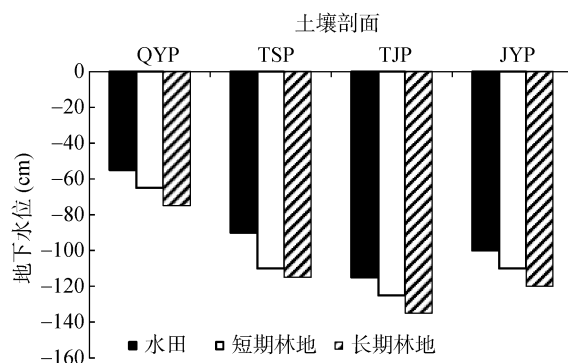
1.3 统计分析

采用 SPSS 10.0 和 Microsoft Excel 2007 软件进行分析数据，Origin 8.0 制图。

2 结果与分析

2.1 土壤水分条件和地下水位的变化

土壤 QYP₁、TSP₁、TJP₁ 和 JYP₁ 所在田块长期种植水稻，大多数年份土温>5 °C 时至少有 3 个月被灌溉水饱和，并呈还原状态，这些土壤具有人为滞水水分状况。改林地后，水田土壤人为滞水水分状况不再存在，由于缺少地表水的补给，地下水位逐渐下降(图 1)。



(QYP, TSP, TJP 和 JYP 分别代表腐心青紫泥田、青紫泥田、青粉泥田和小粉泥田改林地系列土壤剖面，下同)

图 1 水田和林地土壤剖面地下水位

Fig.1 Groundwater levels of studied profiles of paddy fields and forest lands

2.2 土壤 pH 和有机质的变化

水田改林地后，耕作层土壤 pH 明显下降(表 2)，腐心青紫泥田、青粉泥田和小粉泥田系列犁底层土壤 pH 呈下降趋势。改林地后，土壤淀积层、母质层和潜育层土壤受施肥及地表灌溉水影响较小，这些发生层土壤 pH 轻微降低或无明显变化(表 2)。

表 2 水田和林地土壤剖面中铁氧化物组成

Table 2 Soil iron oxides in soil profiles of paddy fields and forest lands

土壤剖面	采样深度(cm)	土层	pH	有机质(g/kg)	全铁(g/kg)	游离铁(g/kg)	活化度(%)	晶胶比	络合铁(g/kg)
QYP ₁	0~14	A	6.36	37.47	44.52	16.79	52.37	0.91	2.53
	14~30	A _p	7.13	30.61	45.52	16.39	43.21	1.31	1.55
	30~75	W _g	7.74	26.80	48.18	22.91	27.93	2.58	1.42
QYP ₂	0~14	A	6.08	29.06	47.24	18.08	42.90	1.33	1.58
	14~30	A _p	7.10	22.16	47.59	17.80	27.79	2.60	1.43
	30~75	W _g	7.59	24.55	50.94	19.74	30.91	2.23	1.53
QYP ₃	0~14	A	5.67	24.68	46.97	18.46	29.52	2.39	1.76
	14~30	A _p	6.33	21.25	46.15	18.18	21.99	3.55	1.65
	30~75	W _g	7.50	23.31	48.57	17.45	35.52	1.82	1.55
TSP ₁	0~12	A	5.57	47.17	47.05	20.58	59.75	0.67	2.15
	12~25	A _p	5.78	38.54	49.42	21.17	49.29	1.03	1.77
	25~47	B ₁	7.37	11.94	50.32	22.87	12.88	6.77	0.81
	47~88	B ₂	7.40	20.26	43.58	21.29	13.71	6.29	0.64
	88~130	W _g	6.05	4.01	43.44	10.30	93.63	0.07	0.17

续表

土壤剖面	采样深度(cm)	土层	pH	有机质(g/kg)	全铁(g/kg)	游离铁(g/kg)	活化度(%)	晶胶比	络合铁(g/kg)
TSP ₂	0~12	A	5.09	31.59	49.75	22.04	48.51	1.06	1.54
	12~25	A _p	6.32	29.99	50.83	22.15	34.47	1.90	0.82
	25~47	B ₁	7.50	6.33	47.57	21.61	13.51	6.40	0.66
	47~88	B ₂	7.39	14.59	44.40	21.49	15.26	5.55	0.57
	88~130	W _g	6.30	3.96	43.49	10.25	93.04	0.07	0.14
TSP ₃	0~12	A	4.55	27.32	50.55	22.37	44.97	1.22	1.37
	12~25	A _p	6.32	16.55	51.41	22.59	24.16	3.14	0.73
	25~47	B ₁	7.34	6.16	47.15	21.23	12.38	7.08	0.62
	47~88	B ₂	7.47	14.02	45.66	22.11	17.58	4.69	0.27
	88~130	W _g	6.11	3.97	43.79	10.35	93.24	0.07	0.14
TJP ₁	0~17	A	5.82	40.23	55.88	20.13	38.73	1.58	1.83
	17~30	A _p	5.71	27.00	65.65	26.40	13.83	6.23	1.54
	30~65	B ₁	6.71	7.95	89.37	44.40	2.64	36.85	0.08
	65~85	B ₂	7.00	7.23	104.92	53.89	1.84	53.35	0.06
	85~140	W _g	6.97	7.88	77.69	31.81	4.99	19.04	0.06
TJP ₂	0~17	A	5.63	30.63	60.72	22.06	29.59	2.38	1.56
	17~30	A _p	5.45	21.01	60.64	23.73	14.58	5.86	1.27
	30~65	B ₁	6.66	7.93	85.59	42.51	2.89	33.57	0.06
	65~85	B ₂	6.79	6.82	100.10	46.90	2.10	46.66	0.06
	85~140	W _g	6.76	7.23	77.60	30.17	4.94	19.24	0.56
TJP ₃	0~17	A	5.12	23.30	61.14	24.24	19.81	4.05	1.44
	17~30	A _p	5.05	15.64	60.26	22.21	15.61	5.40	0.86
	30~65	B ₁	5.85	7.70	83.74	39.96	3.02	32.09	0.41
	65~85	B ₂	6.34	6.85	106.35	54.32	2.38	41.02	0.05
	85~140	W _g	6.88	7.24	77.55	29.40	4.83	19.71	0.55
JYP ₁	0~12	A	6.51	37.07	47.35	12.20	63.76	0.57	2.95
	12~22	A _p	6.54	20.10	49.59	11.29	71.12	0.41	2.39
	22~67	B	7.97	9.93	43.06	10.19	26.57	2.76	1.26
	67~120	C	8.30	5.98	56.74	16.57	7.69	12.01	0.75
	JYP ₂	0~12	A	6.08	27.80	47.72	12.26	55.55	0.80
12~22		A _p	6.42	16.63	50.86	11.46	58.35	0.71	1.58
22~67		B	7.89	7.62	46.21	11.36	17.98	4.56	1.04
67~120		C	8.26	4.72	56.40	16.50	7.17	12.95	0.75
JYP ₃		0~12	A	4.72	23.37	47.93	12.68	50.34	0.99
	12~22	A _p	5.75	14.22	51.56	12.49	43.38	1.30	1.24
	22~67	B	7.88	6.78	48.34	11.58	14.75	5.78	0.68
	67~120	C	8.20	4.41	56.30	16.17	7.03	13.22	0.63

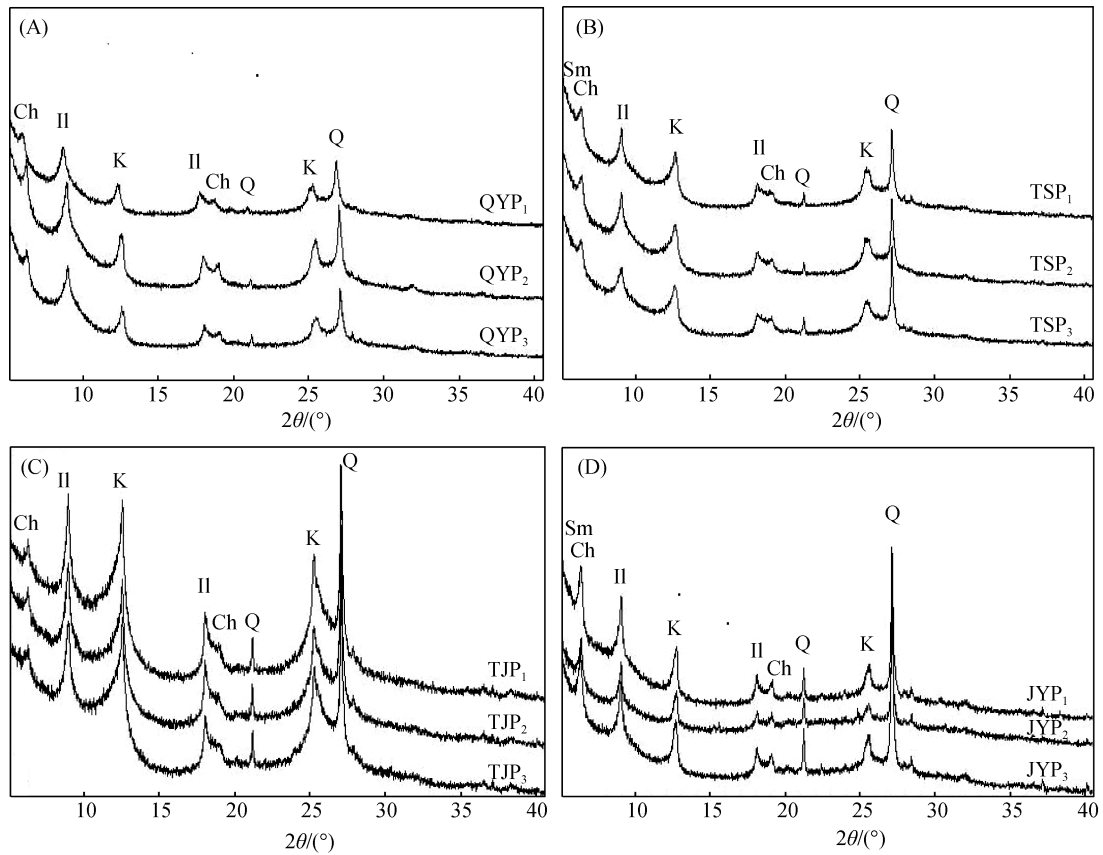
注: 各形态铁均以 Fe₂O₃ 计

水田改林地后, 4 个系列土壤有机质随着植树时间延长整体呈现下降趋势, 并以耕作层和犁底层有机质降低最为明显(表 2), 此外土壤剖面中有机质含量随着土层深度的增加逐渐降低。

2.3 土壤黏土矿物组成的变化

研究选取受人为干扰相对较小的犁底层土壤, 通过 X 射线衍射(X-ray diffraction analysis, XRD)技术对水田改林地系列犁底层土壤黏土矿物类型进行半定

量鉴定, 衍射图谱见图 2。黏土矿物的相对含量采用伊利石、高岭石、绿泥石和蒙脱石特征衍射峰的面积百分比求出, 将 4 种矿物的总含量校正为 100% 后, 得出各矿物的相对含量^[15-16](表 3)。结果表明, 4 个水田改林地系列土壤黏土矿物均以高岭石和伊利石为主, 含量分别为 29.2%~54.2% 和 27.1%~55.2%; 其次为绿泥石和蒙脱石, 含量分别为 3.0%~20.5% 和 13.7%~22.9%。水田改林地后由于自然含水量等



(A、B、C 和 D 分别代表腐心青紫泥田、青紫泥田、青粉泥田和小粉泥田改林地系列剖面；Q：石英；K：高岭石；Ch：绿泥石；II：伊利石；Sm：蒙皂石)

图2 水田和林地犁底层土壤黏土 X 射线衍射图谱

Fig.2 X-ray diffraction spectrograms of clay minerals of subsurface soils in paddy fields and forest lands

表3 水田和林地土壤剖面犁底层土壤主要黏土矿物相对比例

Table 3 Relative percentages of clay mineral in subsurface soils of paddy fields and forest lands

土壤剖面	高岭石(%)	绿泥石(%)	伊利石(%)	蒙皂石(%)	绿泥石/高岭石	伊利石/高岭石	蒙脱石/高岭石
QYP ₁	43.8	6.8	49.4	-	0.16	1.13	-
QYP ₂	40.7	6.8	52.5	-	0.17	1.29	-
QYP ₃	40.3	4.6	55.2	-	0.11	1.37	-
TSP ₁	42.0	5.5	29.7	22.8	0.13	0.71	0.54
TSP ₂	38.4	5.2	34.3	22.2	0.14	0.89	0.58
TSP ₃	47.0	3.0	27.1	22.9	0.06	0.58	0.49
TJP ₁	52.2	15.6	32.2	-	0.30	0.62	-
TJP ₂	54.2	15.9	29.9	-	0.29	0.55	-
TJP ₃	50.8	13.9	35.3	-	0.27	0.69	-
JYP ₁	29.2	20.5	34.2	16.2	0.70	1.17	0.55
JYP ₂	35.3	15.0	35.7	14	0.42	1.01	0.40
JYP ₃	38.5	14.9	32.9	13.7	0.39	0.85	0.36

注：“-”表示“无”；石英(是原生矿物残留)不属于黏土，因而未参与计算。

因素的影响，犁底层土壤中绿泥石相对含量有轻微降低趋势，同时绿泥石与高岭石的比值降低，其他黏土矿物类型及相对含量变化规律不明显。

2.4 全铁和游离铁的变化

水田改林地后，土壤剖面中全铁含量变化不明显(表 2)，这表明在研究的时间尺度范围内(20 a)，

水田改林地不会引起土壤全铁含量的明显变化。土壤耕作层和犁底层游离氧化铁有轻微增加趋势,其他发生层变化不明显(表 2),这与 Takahashi 等^[8]关于水田改旱作后土壤游离铁的变化规律基本一致。

2.5 活性铁、络合铁和亚铁的变化

如图 3 所示,水田改林地后,4 个系列土壤剖面耕作层和犁底层土壤中活性铁含量明显降低,这与

Takahashi 等^[8]关于水田改林地后土壤活性铁的变化规律一致。改林地 15~20 a 后,腐心青紫泥田、青紫泥田、青粉泥田和小粉泥田改林地系列耕作层土壤活性铁分别下降 38.0%、18.2%、38.4% 和 18.0%,活化度分别下降 43.6%、24.7%、48.9% 和 34.9% (表 2)。由于土壤中大量活性铁逐渐老化为晶质铁,耕作层土壤铁氧化物的晶胶比分别增加了 1.62、0.82、1.56 和 0.73 倍(表 2)。

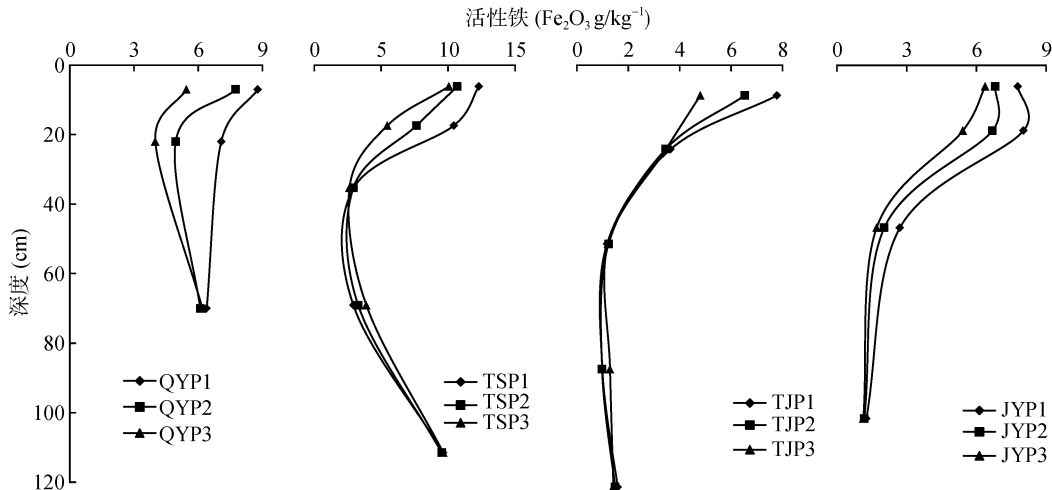


图 3 水田和林地土壤剖面中活性铁分布

Fig.3 Amorphous iron contents in soil profiles of paddy fields and forest lands

络合铁(Fep)是游离铁与有机质结合形成的,属于无定形物质。土壤中络合铁的形成是引起铁离子在土壤中移动的重要原因之一^[13]。改林地 15~20 a 后,4 个系列土壤剖面中络合铁含量有降低的趋势(表 2),其中,耕作层络合铁分别下降 30.4%、36.2%、21.3% 和 33.6%,且其含量随剖面深度的增加而降低,这与土壤剖面中有机质的剖面分布一致。相关性分析显示,4 个系列土壤剖面中络合铁和有机质呈显著正相关,相应的相关性系数分别为 $r_1=0.74^*(n_1=9)$ 、 $r_2=0.92^{**}(n_2=15)$ 、 $r_3=0.94^{**}(n_3=15)$ 和 $r_4=0.96^{**}(n_4=12)$,表明水田改林地后,土壤有机质含量变化是引起土壤络合铁含量变化的重要原因。

水田改林地后,氧化还原电位升高,化学氧化速率明显加快,大量 Fe(II) 在化学氧化和微生物的作用下,重新被氧化为 Fe(III)。改林地后 4 个系列土壤剖面中 Fe(II) 含量都呈现降低趋势,其中耕作层和犁底层土壤中亚铁含量降低最明显(表 4)。改林地后 4 个系列土壤亚铁总量的变化趋势和活性铁的变化趋势基本一致,亚铁与活性铁相关系数分别为 $r_1=0.72^*(n_1=90)$ 、 $r_2=0.75^{**}(n_2=15)$ 、 $r_3=0.82^{**}(n_3=15)$ 和 $r_4=0.62^*(n_4=12)$,其中耕作层亚铁含量变异较大,介于 78.70%~143.88%。

3 讨论

3.1 水田改林地后土壤 pH 和有机质的演变

水田改林地后,人为滞水水分状况消失,土壤通气性增强,氧化还原电位升高,土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在硝化细菌的作用下转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,大量的 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 被氧化,释放出大量的质子(H^+),使土壤酸化^[17]。水田改林地后,由于施用大量氯化钾、过磷酸钙等酸性肥料也加速土壤的酸化。此外,水田改林地后垂直淋洗增强也会对土壤 pH 产生影响^[18]。

水田淹水条件下氧气减少,土壤中的好氧微生物活动基本停止,导致未分解的有机质慢慢积累,改林地后人为滞水水分状况的消失,土壤处于好气状态通气性增强,微生物对有机质的分解速度加快,致使剖面中有机质含量降低。此外,改林地后土壤更加充分地暴露在空气中,促进了有机质化学氧化;植物根系、枝干等植物残体进入土壤的数量减少,致使土壤有机质总量下降^[19-20]。有研究表明,水稻土中有机碳和铁铝键合态的稳定结合可以降低有机碳矿化速率,增强其化学稳定作用,因而通常情况下水田土壤中有机碳较林地土壤高,且积累较快^[20]。

表4 水田改林地系列土壤剖面中亚铁的描述性统计
Table 4 Statistical description of soil ferrous iron in soil profiles of paddy fields and forest lands

土壤剖面	土层 (cm)	平均值±标准差 (mg/kg)	最大值 (mg/kg)	最小值 (mg/kg)	变异系数(%)
QYP	0~14	318.98 ± 251.03	607.46	150.24	78.70
	14~30	273.36 ± 170.77	446.58	105.16	62.47
	30~75	204.73 ± 106.29	281.08	83.34	51.92
TSP	0~12	390.54 ± 471.28	932.69	78.74	120.68
	12~25	112.94 ± 134.05	267.50	28.33	118.69
	25~47	12.02 ± 0.20	12.25	11.89	1.64
	47~88	12.79 ± 2.58	15.59	10.51	20.15
	88~130	585.44 ± 29.44	615.10	556.22	5.03
TJP	0~17	175.62 ± 161.48	360.69	63.36	91.95
	17~30	190.16 ± 174.02	387.80	59.93	91.51
	30~65	29.79 ± 6.12	36.10	23.87	20.56
	65~85	27.04 ± 3.05	29.70	23.70	11.30
	85~140	33.65 ± 10.26	45.39	26.41	30.49
JYP	0~12	610.16 ± 877.90	1 623.07	68.89	143.88
	12~22	335.66 ± 451.29	855.47	43.90	134.45
	22~67	16.75 ± 4.49	21.84	13.33	26.82
	67~120	16.06 ± 2.01	17.87	13.90	12.50

3.2 水田改林地后土壤氧化铁的演变

在土壤形成过程中土壤氧化铁可发生明显的变化,因此土壤氧化铁特性的研究一直是土壤发生学的重要研究内容^[7, 21-22]。水田改林地后土壤耕作层和犁底层土壤游离氧化铁有轻微增加趋势(表 2),原因主要有以下两方面:①水稻土淹水后铁在剖面中容易发生淋溶迁移^[4, 6],水田改林地后,铁在剖面中还原淋溶、氧化淀积作用明显减弱,甚至消失;②由于稻田在季节性干湿交替或强降雨导致大量铁随排水流失,而进入到周边林地土壤,使得水稻土耕作层和犁底层土壤铁减少,周边林地氧化铁含量相对增加;检测结果表明,青紫泥田水稻土表面积水中铁离子浓度达到 1.1 mg/L。

活性铁(Fe_0)是一种不发生 X 射线衍射、比表面积较大、活性较高的水合氧化铁^[13]。淹水使土壤活性氧化铁的含量显著增加^[23],土壤落干又使活性氧化铁转化为结晶态氧化铁,两者可相互转化。水田改林地后,土壤水分含量显著降低,大量活性铁逐渐老化转化为晶质铁;此外土壤有机质含量降低对氧化铁结晶化抑制作用减弱,致使耕作层和犁底层土壤中活性铁含量明显降低,这与 Takahashi 等^[8]和姚玉才等^[24]关于水田改林地后土壤活性铁的变化规律一致。

3.3 土壤氧化铁形态变化对环境的影响

氧化铁和有机质是土壤结构的主要胶结物质,其形态及含量对土壤结构和团聚体的形成具有重要影

响。游离氧化铁是土壤中可变正电荷和负电荷的主要载体,其对某些重金属离子和某些多价的含氧酸根有专性吸附,制约着它们在土壤中的活性。此外,游离氧化铁还是土壤重要的矿质胶结物质,对土壤结构的形成起桥接或联结的作用,并是决定土壤颜色的一个重要因素^[13]。改林地后,4个系列土壤剖面氧化铁形态及空间分布发生显著变化,并对土壤环境产生很大影响。铁氧化物和氢氧化物具有较大的比表面积及表面的化学活性,对部分重金属(如铅、铜、镉、锌)、非金属(如硒、氟)和含氧阴离子(如磷酸盐),有很高的吸附容量,控制着这些元素的形态、浓度和迁移转化,对这些元素植物有效性和环境毒性产生重要影响^[25-26]。重金属一般以专性吸附方式被铁氧化物吸附,被吸附的重金属离子不易通过离子交换反应释放到溶液中^[17]。土壤去除氧化铁和有机质后的总孔体积和总孔隙率显著降低,尤其以氧化铁的影响更为明显^[27]。

水田改林地后,虽然因铁还原溶解而释放的重金属减少,但土壤氢氧化铁、活性铁等比表面积较大的土壤铁氧化物逐渐老化为晶质态,其比表面积下降,对重金属和非金属的吸附能力降低,从而影响到这些元素的植物有效性和环境毒性。无定形氧化铁在淹水条件,可增加对磷的吸附^[28]。水田改林地后,土壤中活性铁含量降低,对磷的吸附性减弱,从而增加了磷素在环境中的淋失风险。

4 结论

水田改林地后,土壤剖面的地下水位下降,土壤逐渐酸化,有机质含量下降,土壤绿泥石含量下降。土壤氧化铁形态和空间分布发生明显变化,整体表现为土壤剖面发生层中全铁变化不明显,游离铁含量略微增加,活性铁、络合铁、亚铁总量呈降低趋势,铁氧化物的晶胶比显著增加。水田改林地后,土壤发生学性质发生显著变化,土壤铁氧化物形态和数量的变化能够对土壤结构及土壤重金属的迁移转化等产生重要影响。

参考文献:

- [1] 王天豪, 韩春兰, 王秋兵. 辽宁省植稻土壤在中国土壤系统分类中的归属[J]. 土壤通报, 2018, 49(1): 1-8.
- [2] 姚玉才, 邱志腾, 杨良觐, 等. 贵州省典型水耕人为土的发生学性状与系统分类研究[J]. 土壤通报, 2018, 49(2): 253-259.
- [3] 刘沛, 周卫军, 顾海滨, 等. 澧阳平原古水稻土铁形态演变特征[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1151-1156.
- [4] 丁昌璞, 徐仁扣. 土壤的氧化还原过程及其研究法[M]. 北京: 科学技术出版社, 2011: 158-158.
- [5] 李国刚. 中国近海表层沉积物中粘土矿物的组成、分布及其地质意义[J]. 海洋学报, 1990, 12(4): 470-479.
- [6] 龚子同. 中国土壤系统分类理论·方法·实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 109-194.
- [7] 孙丽蓉, 曲东. 电子穿梭物质对异化 Fe (III) 还原过程的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(4): 192-198.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 嘉兴市土壤志编辑委员会. 嘉兴土壤[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1991: 218-223.
- [11] 绍兴市农业局. 绍兴市土壤[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1991: 5-253.
- [12] 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: 3-195.
- [13] 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: 12-207.
- [14] 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.
- [15] 艾丽娜, 韩宗珠, 王双, 等. 渤海海表层沉积物粘土矿物组成及分布特征对物源的指示意义[J]. 海洋湖沼通报, 2016(5): 60-68.
- [16] 彭淑贞, 郭正堂. 风成三趾马红土与第四纪黄土的粘土矿物组成异同及其环境意义[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 277-285.
- [17] 于天仁, 陈志诚. 土壤发生中的化学过程[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 10-415.
- [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]. 成都: 中国土壤学会第十二次全国会员代表大会暨第九届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会. 2012, 8: 349-354.
- [19] 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.
- [20] 周萍, 宋国菡, 潘根兴. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 II. 团聚体内有机碳的化学结合机制[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 263-273.
- [21] 黄成敏, 龚子同, 杨德涌. 海南岛北部玄武岩上土壤发生研究 II. 铁氧化物特征[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 449-458.
- [22] 常庆瑞, 冯立孝, 阎湘. 陕西汉中土壤氧化铁及其发生学意义研究[J]. 土壤通报, 1999, 30(1): 14-16.
- [23] Kumar S, Pahwa S K, Proroil A K. Changes in some physic-chemical properties and activities of iron and zinc submergence of some rice soils[J]. Journal of Indian Society of Soil Science, 1981, 29: 204-207.
- [24] 姚玉才, 邱志腾, 陈小梅, 等. 水耕人为土长期改旱后土壤类型演变的探讨[J]. 土壤通报, 2016, 47(5): 1029-1035.
- [25] 于天仁, 季国亮, 丁昌璞, 等. 可变电荷土壤的电化学[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 12-295.
- [26] 蔡妙珍, 邢承华. 土壤氧化铁的活化与环境意义[J]. 浙江师范大学学报 (自然科学版), 2004, 27(3): 279-282.
- [27] 韦杨嫣. 胶结物质对土壤孔隙结构的影响及土壤性状对酸化的响应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [28] 邵兴华. 水稻土淹水过程铁氧化物转化对磷饱和度和磷、氮释放的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.