

澧阳平原古水稻土铁形态演变特征^①

刘沛¹, 周卫军^{1*}, 顾海滨², 李娟¹, 郭子川¹, 肖彦资¹

(1 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2 湖南文物考古研究所, 长沙 410003)

摘要: 采用野外采样与室内分析的方法, 研究了澧阳平原杉龙岗遗址埋藏古水稻土与现代耕作水稻土铁形态、含量变化及剖面演变特征, 探讨了土壤铁形态变化与成土过程的关系。结果表明: 澧阳平原现代耕作水稻土与埋藏古水稻土铁形态及含量分别为: 全铁 31.61~35.10 g/kg 和 33.97~46.88 g/kg, 游离铁 8.88~13.92 g/kg 和 11.10~20.36 g/kg, 无定型铁 2.52~4.06 g/kg 和 2.64~3.35 g/kg, 结晶态铁 5.06~11.40 g/kg 和 8.46~17.43 g/kg。澧阳平原水稻土各形态铁含量除无定型铁外, 其他形态铁含量总趋势为埋藏古水稻土>现代耕作水稻土, 且古水稻土各形态铁分异明显。现代耕作水稻土全铁、游离铁、结晶铁含量均呈现随深度加深而增加趋势, 而无定型铁则相反, 且各形态铁含量波动性较小; 埋藏古水稻土全铁含量随土层增深而增加, 无定型铁含量呈现微幅增加趋势, 但游离铁和结晶铁含量变化有异, PA 剖面减少, PC 剖面增加, 埋藏古水稻土中各形态铁含量变化趋势多样。澧阳平原古水稻土的铁有明显的淋溶淀积特征, 不同形态铁在各土层变异较大, 埋藏古水稻土铁富集明显。

关键词: 古水稻土; 全铁; 游离铁; 无定型铁; 晶质铁

中图分类号: S152.1

自河姆渡发现稻谷遗存和稻作农具以来, 水稻的起源和传播成为考古学、农学、遗传学、土壤学和环境学研究共同感兴趣的课题。考古专家在澧阳平原杉龙岗遗址、连续发掘的澧县八十挡遗址^[1], 发现炭化稻谷; 在彭头山遗址, 发现大量稻壳; 在城头山遗址, 发现全世界最早的古稻田; 在鸡叫城遗址, 发现堆积如山的炭化谷糠。但此前对古水稻土壤研究方面同绰墩遗址古水稻土研究一致, 主要针对古水稻土形成与演变、土壤肥力特征^[2]、养分的释放、质量特征、生物学特性^[3-4]、植硅体形态及其矿化^[5]等, 古水稻土铁形态特征与演变的研究很少。李俊等人^[6]提出铁是土壤、沉积物和水相颗粒物中最丰富、也是最重要的矿物组成之一。马毅杰和陈家坊^[7]研究揭示铁形态、着色、迁移及随环境而变化的特征, 在土壤剖面的某些特征或特征层的形成中起着重要的作用。邢世和等人^[8]则发现古水稻土耕层中的晶质铁和非游离铁被活化、淋溶, 耕层下的活性铁在心土层氧化淀积, 这说明铁形态具有较高的活性, 易随环境条件的变化而转变^[9], 且各种形态之间也可以相互转化^[10-11]。由于在水稻土成土过程中, 土壤养分深受水耕复种、水旱

轮作及施肥等耕作措施的影响, 尤其是亚铁和亚锰随渗漏水向下移动, 导致一定深度氧化淀积, 从而重新分布于土壤剖面^[12]。因此, 本文借助杉龙岗考古剖面进行了采样分析, 研究了古今水稻土的铁形态含量变化特征及其剖面演变规律, 以期阐明水稻土成土过程土壤铁形态的演变和转化机制, 为揭示水稻土成土过程中土壤铁形态变化及演变规律提供理论和实际依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品的采集

2012年12月在湖南常德临澧县新安镇杉龙村古水稻考古点(29°40'3.97" N, 111°30'41.11" E)(图1), 澧阳平原澧水与澧水之间, 进行了土壤剖面样品的采集。该地气候介于中亚热带向北亚热带过渡的季风气候区, 属长江中游地区, 大陆性气候特点明显, 雨量丰沛, 光照充足, 温暖湿润, 年均气温 16.5℃, 年日照平均约 1 770 h, 年降水 1 100~1 300 mm。

土壤剖面样品在湖南省文物考古研究所挖掘的考古剖面上采集, 土壤层次根据颜色、结构、新生体、松紧状况等特征划分, 土壤剖面的理化性状见表 1。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371288)资助。

* 通讯作者(wjzh0108@163.com)

作者简介: 刘沛(1977—), 女, 湖南邵阳人, 博士研究生, 讲师, 主要从事土地/土壤环境过程及模拟研究。E-mail: 379323772@qq.com



图 1 研究区示意图

Fig. 1 The map of study area

表 1 供试水稻土基本理化性质

Table 1 Basic physical chemical properties of the tested paddy soils

剖面	土层	深度(cm)	pH	有机质(g/kg)
PA	A1 耕作层	0~27.5	7.50	24.00
	P1 犁底层	27.5~33	7.70	9.10
	W1 潜育层	33~49	7.50	9.30
	C1 母质	49~55	7.40	10.00
	A2 耕作层	55~68	7.40	11.70
PC	P2 犁底层	68~76	7.50	9.50
	A1 耕作层	0~16	7.50	18.70
	P1 犁底层	16~18	7.40	10.60
	W1 潜育层	18~27	7.10	9.00
	C1 母质	27~39	7.30	8.80
	A2 耕作层	39~48	7.20	11.90
	P2 犁底层	48~54	7.10	12.30
	W2 潜育层	54~61	7.00	12.20
	C2 母质	61~67	6.90	10.60

土壤样品的采集自下往上分层进行,每层采集土壤 1 kg 左右,带回实验室,捏碎,检出肉眼可见的根系等杂物,自然风干,用四分法分为 2 份,1 份原样保存,1 份磨碎,分别过 10 目和 100 目,保存

备用。

本文选取了 2 个古水稻土剖面(PA 和 PC)。根据土壤剖面特性和年代测定结果,剖面可以分为 2 个典型的层次,其中剖面 PA(0~55 cm)和剖面 PC(0~39 cm)均为现代耕作水稻土,剖面 PA(55~76 cm)和剖面 PC(39~78 cm)均为距今约 3 000 年的埋藏古水稻土。

1.2 分析测定方法

土壤全铁用 HF-HNO₃-HClO₄ 消煮-原子吸收分光光度法测定;游离铁用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠浸提-邻菲罗啉比色法测定;无定型铁用草酸铵缓冲液浸提-邻菲罗啉比色法测定;有机质用重铬酸钾-硫酸消化法测定;pH用水提电位法测定。具体测定方法见文献[13]。

1.3 数据统计与分析

所有野外调查与分析测定数据均用 Excel 2003 进行管理与分析。

晶质铁 = 游离铁 - 无定型铁;游离度(%) = 游离铁/全铁×100;活化度(%) = 无定型铁/游离铁×100;晶化度(%) = 晶质铁/游离铁×100。

2 结果与分析

2.1 土壤全铁的变化特征

杉龙岗遗址古水稻土全铁含量变化情况见图 2。可以看出,杉龙岗遗址古水稻土全铁含量变化范围为 31.61~46.88 g/kg,与杨义^[14]的研究结论一致。其中,2 个剖面全铁含量随深度增加而上升,母质层全铁含量最高,PA 和 PC 剖面在现代耕作水稻土中分别为 35.06 g/kg 和 35.10 g/kg;埋藏古水稻土中分别为 37.15 g/kg 和 46.88 g/kg,且全铁含量表现为埋藏古水稻土高于现代耕作水稻土,这与卢佳等^[15]的研究结果相似。现代耕作水稻土中,2 剖面全铁含量在耕作层和犁底层中不同,PA 剖面犁底层较耕作层减少了 0.56 g/kg,PC 剖面犁底层较耕作层增加了 1.76 g/kg;而在埋藏古水稻土中,耕作层与犁底层全铁含量差值明显大于现代水稻土,犁底层分别增加了 3.18 g/kg 和 1.24 g/kg。

现代耕作水稻土与埋藏古水稻土全铁的变化趋势一致(图 2),均表现为耕作层<犁底层<潜育层<母质层,但埋藏古水稻土全铁含量变化较大,而现代耕作水稻土中全铁含量变化较小。可见,埋藏古水稻土中全铁的累积速度较快,向下的迁移量相对较大。而现代耕作水稻土经氧化过程(非植稻期间)和还原过程(植稻期间)周期性交替^[16],表层土壤风化产生氧化铁,但向下迁移量较少。

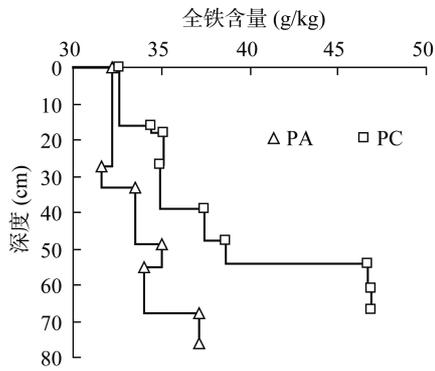


图 2 全铁含量随剖面采样深度的变化
Fig. 2 Changes of total iron in soil profiles

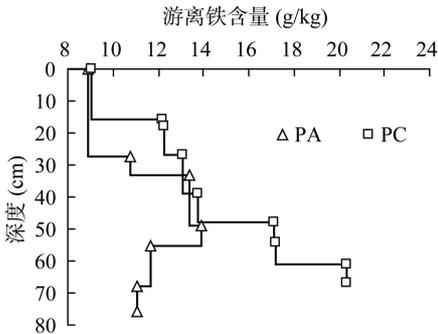


图 3 游离铁含量随剖面采样深度的变化
Fig. 3 Changes of free iron in soil profiles

2.2 土壤游离铁的变化特征

游离铁能反应含铁硅酸盐矿物在化学风化过程中释放出铁的比例。从图 3 可以看到，杉龙岗遗址古水稻土游离铁的变化范围为 8.88 ~ 20.36 g/kg，其中 2 个剖面游离铁含量以现代耕作水稻土的耕作层最低，PA 和 PC 剖面分别为 8.88 g/kg 和 9.07 g/kg，且游离铁含量表现为埋藏古水稻土大于现代耕作水稻土。在现代耕作水稻土中，耕作层游离铁含量明显低于犁底层，犁底层较耕作层 PA 剖面增加了 1.85 g/kg 和 PC 剖面增加了 3.10 g/kg；但埋藏古水稻土中 2 剖面不一致，犁底层较耕作层 PA 剖面减少了 0.56 g/kg，PC 剖面增加了 3.34 g/kg，但 PA 剖面埋藏古水稻土中游离铁含量明显减少，PC 剖面持续增加且增加量大于现代耕作水稻土。

由游离铁含量变化趋势可知，在现代耕作水稻土中，2 个剖面游离铁含量都呈增加的趋势，即是耕作层 < 犁底层 < 潜育层 < 母质层，整体分布较为均一。在埋藏古水稻土中，2 个剖面之间以及各剖面不同土层之间游离铁含量变化完全不同且整体变化幅度较大，PA 剖面耕作层 > 犁底层，PC 剖面耕作层 < 犁底层 < 潜育层 < 母质层。

另外，游离度可反映铁淋溶迁移的程度^[17]。由表 2 可知，埋藏古水稻土耕作层的游离度分别

为 PA 剖面 34.34% 和 PC 剖面 36.76%，犁底层的游离度分别为 PA 剖面 29.87% 和 PC 剖面 43.44%，且除埋藏古水稻土 PA 剖面犁底层外，埋藏古水稻土游离度均大于现代耕作水稻土，这说明埋藏古水稻土铁淋溶迁移程度高，不同的是铁迁移程度，PA 剖面耕作层 > 犁底层，PC 剖面耕作层 < 犁底层。

综上，土壤游离铁的含量随着土层深度的增加而朝着不稳定的趋势变化，埋藏古水稻土中游离铁淋溶迁移程度高。

2.3 土壤无定型铁的演变特征

无定型铁是以非结晶形态存在的铁。从图 4 可以看出，杉龙岗遗址古水稻土无定型铁含量变化范围为 2.52 ~ 4.06 g/kg，其中 2 个剖面无定型铁含量最高的值均在现代耕作水稻土中，分别为 PA 剖面 3.41 g/kg (耕作层) 和 PC 剖面 4.06 g/kg (犁底层)，且无定型铁含量表现为埋藏古水稻土小于现代耕作水稻土。耕作层与犁底层无定型铁含量值不同，在现代耕作水稻土中，犁底层较耕作层 PA 剖面减少了 0.06 g/kg，PC 剖面增加了 0.05 g/kg；而在埋藏古水稻土中，犁底层较耕作层 PA 剖面减少了 0.05 g/kg，PC 剖面增加了 0.20 g/kg，这说明各剖面埋藏古水稻土无定型铁迁移情况与现代耕作水稻土一致。

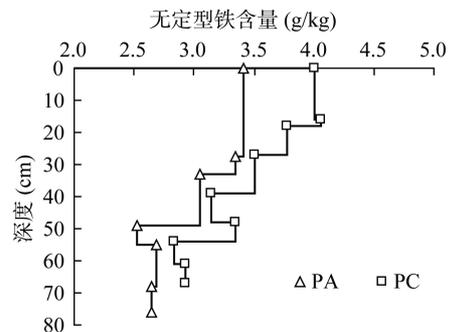


图 4 无定型铁含量随采样深度的变化
Fig. 4 Changes of amorphous iron in soil profiles

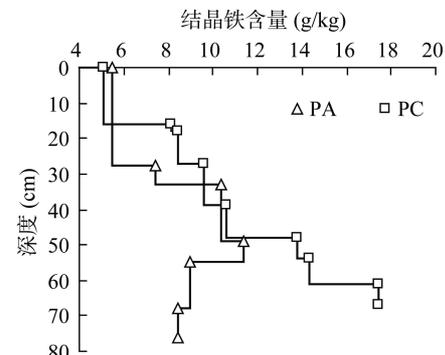


图 5 晶质铁含量随采样深度的变化
Fig. 5 Changes of crystal iron in soil profiles

由无定型铁含量变化趋势可知,在现代耕作水稻土中,2 个剖面无定型铁含量总趋势表现为耕作层>犁底层>潜育层>母质层,且变化幅度较大,而在埋藏古水稻土中无定型铁含量变化有起伏,且变化幅度较大,PA 剖面耕作层>犁底层,PC 剖面犁底层>耕作层>母质层>潜育层。

另外,活化度是土壤风化程度的重要指标。如表 2 所示,埋藏古水稻土耕作层的活化度分别为 PA 剖面 23.08%和 PC 剖面 22.85%,犁底层的活化分别为 PA 剖面 23.76% 和 PC 剖面 19.57%,且埋藏古水稻土活化度均小于现代耕作水稻土,这说明埋藏古水稻土的风化程度弱于现代耕作水稻土,但风化程度具体为 PA 剖面耕作层>犁底层,PC 剖面耕作层<犁底层。

综上,土壤无定型铁含量在现代耕作水稻土中随着土层深度增加明显下降,而在埋藏古水稻土中变化差异较大。

2.4 土壤结晶铁的变化特征

游离铁中非无定型铁部分称为结晶态铁。从图 5 可以看出,杉龙岗遗址古水稻土结晶铁含量变化范围为 5.06 ~ 17.43 g/kg,其中 2 个剖面现代耕作水稻土的耕作层结晶态铁含量最低,分别为 PA 剖面 5.47 g/kg 和 PC 剖面 5.06 g/kg,且结晶铁含量表现为埋藏古水稻土大于现代耕作水稻土。在现代耕作水

稻土中,耕作层结晶铁含量明显低于犁底层,犁底层较耕作层 PA 剖面增加了 1.19 g/kg,PC 剖面增加了 3.06 g/kg;而在埋藏古水稻土中,PA 剖面犁底层较耕作层减少了 0.51 g/kg,PC 剖面犁底层较耕作层增加了 3.14 g/kg,且 PA 剖面埋藏古水稻土结晶铁含量明显低于现代耕作水稻土。

由结晶铁含量变化趋势可知,在现代耕作水稻土中,2 个剖面结晶铁含量趋势表现为耕作层<犁底层<潜育层<母质层,且变化幅度不大,而在埋藏古水稻土中 2 剖面结晶铁含量变化不同,PA 剖面耕作层>犁底层,PC 剖面耕作层<犁底层<潜育层<母质层。

另外,晶化度也能确切地反映出水稻土中晶质铁和无定形铁之间的转化状况。如表 2 所示,埋藏古水稻土耕作层的晶化度分别为 PA 剖面 76.93% 和 PC 剖面 77.12%,犁底层的晶化度分别为 PA 剖面 76.22% 和 PC 剖面 80.42%,且埋藏古水稻土晶化度大于现代耕作水稻土,这说明埋藏古水稻土中无定型铁向结晶铁转化的趋势较大,且不同剖面埋藏古水稻土中晶质铁和无定形铁转化趋势也不同。

综上,结晶铁在现代耕作水稻土中随着土层深度增加而增加,而在埋藏古水稻土中变化趋势不平稳,且变化趋势不一致。

表 2 古水稻土不同深度铁形态特征值

Table 2 The eigenvalues of iron forms in different depths in buried ancient paddy profiles

剖面	土层	深度(cm)	游离度(%)	活化度(%)	晶化度(%)
PA	A1	0 ~ 27.5	27.60	38.40	61.60
	P1	27.5 ~ 33	33.94	31.22	68.78
	W1	33 ~ 49	39.96	22.78	77.22
	C1	49 ~ 55	39.70	18.10	81.90
	A2	55 ~ 68	34.32	23.07	76.93
	P2	68 ~ 76	29.88	23.78	76.22
	PC	A1	0 ~ 16	27.77	44.21
P1		16 ~ 18	35.36	33.36	66.72
W1		18 ~ 27	34.84	30.91	69.09
C1		27 ~ 39	37.42	26.83	73.17
A2		39 ~ 48	36.77	22.88	77.12
P2		48 ~ 54	44.22	19.58	80.42
W2		54 ~ 61	36.82	16.47	83.53
C2		61 ~ 67	43.43	14.39	85.61

3 结论与讨论

1) 在现代耕作水稻土与埋藏古水稻土铁含量的比较中发现,土壤的全铁、游离铁、晶质铁含量呈现自上而下增加的趋势,而无定型铁含量刚好相反;土

壤均出现还原淋溶和氧化淀积现象,埋藏古水稻土铁形态分异尤为明显。

2) 古水稻土特征值分析表明,现代耕作水稻土,游离度、活化度和晶化度的值比埋藏古水稻土大,这反映了耕作促进表层游离铁的形成并抑制其向晶质

铁转化。而在埋藏古水稻土中,游离度与晶化度增加,活化度却明显降低,这说明随着深度的增加氧化铁含量分布趋势不稳定,游离铁与结晶铁在埋藏古水稻土中累积明显。

3) 古水稻土发育初期,古气候环境温暖湿润,适宜生物活动^[18],但水稻种植在“火耕水耨”条件下进行,土壤矿质黏粒风化较弱,这个时期铁形态分布几乎由古水稻土自然成土过程支配。而现代水稻种植的机械化耕作和大量化肥施用,这种非自然成土过程对现代水稻土及古水稻土铁形态分布产生双重影响,整个剖面中铁形态分布的分布状况也反应出了二次成土过程。

4) 影响土壤形成的因素包括自然成土因素和人为成土因素,而水稻土发育于自然土壤之上、经过人为水耕熟化形成,其受人为影响较大。而本研究的结果仅体现了两次水稻土成土过程影响铁含量的分布,成土过程的不确定性亦需要高度关注。

参考文献:

- [1] 裴安平. 彭头山文化的稻作遗存与中国史前稻作农业再论[J]. 农业考古, 1998, (1): 193-203
- [2] 曹志洪, 杨林章, 林先贵, 胡正, 董元华, 章钢娅, 陆彦椿, 尹睿, 吴艳宏, 丁金龙, 郑云飞. 绰墩遗址新石器时期水稻田、古水稻土剖面、植硅体和炭化稻形态特征的研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 838-847
- [3] 李久海, 董元华, 曹志洪, 王辉, 安琼, 胡正义, 杨林章, 林先贵, 尹睿. 古水稻土中多环芳烃的分布特征及其来源判定[J]. 环境科学, 2006, 27(6): 1 235-1 239
- [4] 胡君利, 林先贵, 褚海燕, 尹睿, 张华勇, 王俊华, 曹志洪, 胡正义. 种植水稻对古水稻土与现代水稻土微生物功能多样性的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 280-287
- [5] 程月琴, 杨林章, 曹志洪. 绰墩遗址古今水稻土黏土矿物特征比较研究[J]. 土壤, 2011, 43(4): 617-622
- [6] 李俊, 谢丽, 盛杰, 栾富波, 周琪. Fe(II)/铁氧化物表面结合铁系统还原有机污染物的研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(1): 25-32
- [7] 马毅杰, 陈家坊. 我国红壤中氧化铁形态及其特性和功能[J]. 土壤, 1998, 30(1): 1-6
- [8] 邢世和, 吴金奖, 林景亮. 水稻土发生分类的研究 I. 铁的淋溶淀积与水稻土的发育[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 1988(1): 62-67
- [9] 何群, 陈家坊, 许祖诒. 土壤中氧化铁的转化及其对土壤结构的影响[J]. 土壤学报, 1981, 18(4): 326-334
- [10] Torrent J, Cabedo A. Sources of iron oxides in reddish brown soil profiles from calcarenites in Southern Spain[J]. Geoderma, 1986, 37: 57-66
- [11] Aaron T, Oliver AC, Denis GR, Jon C. Iron-oxide crystallinity increases during soil redox oscillations[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70: 1710-1727
- [12] Cheng YQ, Yang LZ, Cao ZH, Ci E, Yin SX. Chronosequential changes of selected pedogenic properties in paddy soils as compared with non-paddy soils[J]. Geoderma, 2009, 151: 31-41
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京市: 农业出版社, 1988, 322-389
- [14] 杨义. 重庆水稻土剖面胶膜中铁锰形态特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007: 30-32
- [15] 卢佳, 胡正义, 曹志洪, 杨林章, 林先贵, 董元华, 丁金龙, 郑云飞. 长江三角洲绰墩遗址埋藏古水稻土肥力特征研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(1): 109-117
- [16] 马良, 徐仁扣. 不同耕种年限红壤性水稻土理化性质的变化特征[J]. 土壤, 2010, 42(4): 560-563
- [17] 刘晔, 关连珠, 张瑞杰, 朱宁, 崔桂芳, 颜丽. 不同利用方式下棕壤中氧化铁的存在形态和分异特征研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(2): 181-183
- [18] 谢巧勤, 陈天虎, 孙玉兵, 李晓萱, 徐晓春. 洛川黄土-红粘土序列铁氧化物组成及其古气候指示[J]. 矿物学报, 2008, 28(4): 390-396

Evolution of Iron Forms in Ancient Paddy Soils in Liyang Plain

LIU Pei¹, ZHOU Wei-jun^{1*}, GU Hai-bin², LI Juan¹, GUO Zi-chuan¹, XIAO Yan-zi¹

(1 *College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China*; 2 *Hunan Provincial Institute of Cultural Relics and Archaeology, Changsha 410003, China*)

Abstract: The field sampling and laboratory analysis were conducted to study the content changes of iron forms and their profile variations in current paddy soils and buried ancient paddy soils at Sanlonggang Village of Liyang Plain. The relationship between the changes of iron forms and soil forming process were also analyzed. The results showed that the contents of different iron forms in current and buried ancient paddy soils in Liyang Plain were: total iron 31.61–35.10 g/kg and 33.97–46.88 g/kg; free iron 8.88–13.92g/kg and 11.10–20.36g/kg; amorphous iron 2.52–4.06 g/kg and 2.64–3.35g/kg; crystal iron 5.06–11.40g/kg and 8.46–17.43g/kg, respectively. Except amorphous iron, the concentrations of other iron forms changed in the trend of ancient paddy soils > current paddy soils. Obvious variations of different iron forms were observed in buried ancient paddy soils. For the current paddy soil, the contents of total iron, free iron and crystal iron increased with increasing depth, the opposite trend was found for amorphous iron, and the variations of different iron forms in the profile changed less. For buried ancient paddy soils, the content of total iron increased with increasing depth while amorphous iron increased slightly, the contents of free iron and crystal iron decreased in PA profile but increased in PC profile. The change modes of the different iron forms were diverse in the buried ancient paddy soils, obvious iron eluviation and deposition process were existed in the ancient paddy soils, the contents of different iron forms changed significantly in different horizons and the iron enrichment were obviously the buried ancient paddy soils.

Key words: Ancient paddy soil; Total iron; Free iron; Amorphous iron; Crystal iron