

中国史前灌溉稻田和古水稻土研究进展*

曹志洪

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所),南京 210008)

摘 要 通过连续 4 a 多的研究,科学地证明了位于江苏昆山绰墩遗址的稻田群是迄今发现的地球上最早的灌溉稻田群(6 280 a BP),提出了一套诊断古水稻田和古水稻土的技术指标;获得了新石器时期“火耕水耨”——原始灌溉稻作技术的科学证据。阐明了史前水稻土和现代水稻土表层有机质、全氮和全钾含量接近,而全磷、有效磷则是前者大大高于后者的事实,是先民长期以动物残余物肥田的结果。古、今水稻土有机质含量均高于同时期旱地土,揭示了稻田生态系统和水稻土固持大气二氧化碳的巨大潜力。新石器时期水稻土也含有较高的多环芳烃(PAHs)等有机污染物,是源于田间秸秆的焚烧。微生物学的研究表明,史前水稻土产甲烷潜势很低,硝化功能完全丢失。提出了今后应进一步研究的问题。

关键词 灌溉稻田起源;原始水稻土管理;古水稻土的特征;稻田固碳潜力

中图分类号 S151 **文献标识码** A

1 中国土壤学家的历史责任

通过对古土壤发生、演变的研究,了解历史上农业发展的历程及全球气候变化对土壤质量的影响,并与目前正在发生的全球气候变化及其对土壤和陆地生态系统安全的影响做比较,提出应对生态安全、社会可持续发展的策略与思路,例如国际上关于扩大土壤大量固持二氧化碳的所谓“Terra Preya”技术就是在研究巴西亚马逊流域古土壤(黑色土)中的黑碳引伸出来的土壤技术。研究古土壤已成为国际土壤学界新的研究热点,2006年在美国费城召开的世界土壤学大会上将“古土壤”增列为“土壤的时空演变(Division-1)”大专业下的“第6专业委员会”。该专业委员会在此次大会上共发表论文55篇,是这个大专业范围内论文最多的分支学科之一^[1-4]。

我国水稻栽培已有7 000 a以上历史,目前的稻谷产量和稻田面积分别占世界的40%和23%,稻米是国人的主食。开展灌溉稻田和水渍人为土起源、演化及古今水稻土质量比较的研究,揭示水稻土发生发育过程的生物地球化学机制,阐明水稻土可持续利用机理,应该是我国土壤学界对土壤学理论和世界粮食安全作出重要贡献的优先领域之一。

在国家自然科学基金委员会的支持下,从2004年起开展了“中国史前水稻田和古、今水稻土质量比较”的研究,以揭示7 000 a以来我国稻作农业的兴衰与全球气候变化的关系以及灌溉稻田和水耕人为土起源及其对世界文明的贡献。本文就这方面研究已有的进展及今后的研究方向做一综述,与读者交流。

2 古水稻土研究获得的初步成果

2.1 史前灌溉稻田与水稻土的鉴别标准

研究和确认史前水稻田与研究史前和古代的水稻土是土壤学的一项基础性、理论性的工作,由于资源或技术等原因,在本项目开展前国内外的土壤学界涉及这方面研究的报道很少。除中国科学院南京土壤研究所的龚子同等^[5]从土壤地理、时空分布的角度做过一些研究外,主要是考古部门在发掘过程中出土了碳化稻粒时提及可能有稻谷种植的报道,其中在江苏草鞋山遗址中日联合发掘时发现了考古学上的古水稻田^[6]。位于现在江苏省昆山市绰墩遗址(31°24'07"N, 120°50'41"E)发掘出土的新石器时期(6 280¹⁴C a BP)22块灌溉稻田是迄今世界上最早的灌溉稻田,应是国际土壤分类系统公认的水耕人为土类——“水稻土”的起源地之

* 国家自然科学基金重点项目(40335047)资助

作者简介:曹志洪(1941~),浙江余姚人,研究员,主要从事土壤、植物营养与环境研究

收稿日期:2008-05-09;收到修改稿日期:2008-05-29

—^[7-9]。由于远古(6 000 ¹⁴C a BP的马家浜时期)的水稻田面积较小,因而可以在有限的发掘范围内发现其田埂、灌水沟渠等稻田的边界,而到了3 000 ¹⁴C a BP的商周-马桥时期的稻田面积可能已经较大,所以很难发现稻田田块的边界,当然埋藏的水稻土剖面则仍然可以清晰的鉴别和研究^[7-9]。

国际水稻研究所前副所长、英国的Greenland教授为定义现今的灌溉稻田提出了稻田构成的三个要素:田埂、灌溉渠道和灌溉工具^[10]。2003年11月项目研究组与苏州市博物馆、苏州市农业环境检测站、昆山市文物保护管理所等合作对位于绰墩遗址第V工作区进行第六次发掘,在300 m²的发掘范围内,距地表100~118 cm深的原生土面上又发现有大小(面积为0.5~14 m²)和形状(长方形、长条形、圆形、椭圆形、近三角形等)不一,但均有田埂和进出水口(图1)、周边有配套的灌溉沟渠和水井、小池塘的田块22块,将其编号为S25~S46。并在

田块和沟渠内发现大量陶器碎片、少量完整的陶盆和陶罐等,应是当时灌溉和取水兼用的工具等^[6-9]。河姆渡及长江下游其他地方发现的马家浜时期的大量木杵、骨杵或石杵等工具^[11]足以能在生土面上(绰墩山是下蜀黄土)构筑田埂、开挖沟渠和不很深的水井。根据研究^[6-9],在这些田块的表层土壤中有很多碳化稻粒及灰炆。例如在编号为S27的稻田0.04 m³的表土里就淘洗出200多粒碳化稻以及菱角和红蓼等水生植物的种子。至此,在草鞋山(1992年至1995年的发掘)、绰墩山(2003年4月、2003年11月的两次发掘)两个遗址共出土了马家浜时期的水稻田90块^[6]。根据Greenland的定义和考古学家的工作,是可以定义史前的“水稻田”了。但是,土壤学家必须用土壤剖面分异、黏粒移动、孢粉学特征、植硅体分布、土壤有机质核磁共振谱和土壤磁化率的变化等理论和技术,对这些水稻田进行土壤学界定。

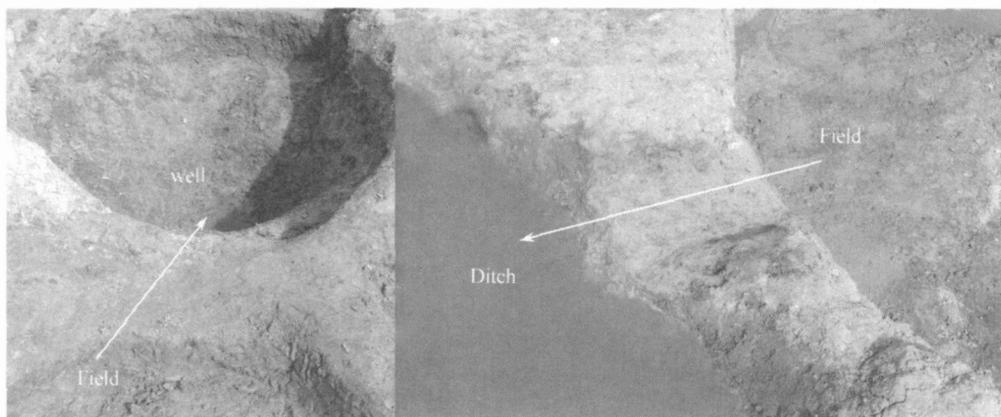


图1 绰墩遗址史前稻田的田埂、灌溉水进出的水口(控制田内水层)(右:田与渠道间的水口;左:田与水井或池塘间的水口)

Fig.1 Water outlet/in let at Prehistoric paddy field dam for water level control (Right from field to irrigation ditch or backwards; Left from field to well or pond)

表1 史前(6 000 a BP)水稻土和旱地土的一些理化性质

Table 1 Some physi-chemical properties of prehistoric (6 000 a BP) paddy and upland soils

| 土层 Horizon | 深度 Depth (cm) | 水稻植硅体 Rice opal (No. g ⁻¹) | pH | 有机质 OM (g kg ⁻¹) | 2 μm黏粒含量 2 μm Clay (%) |
|---|------------------|---|------|---------------------------------|---------------------------|
| 史前水稻土 P-01 Prehistoric paddy soil P-01 | | | | | |
| A | 100~116 | 105 159 | 5.85 | 22.31 | 11.9 |
| Ap | 116~130 | 64 007 | 5.90 | 18.26 | 15.0 |
| B | 130~150 | 17 327 | 5.86 | 19.68 | 11.2 |
| C | 150~160 | 19 678 | 5.75 | 17.20 | 12.1 |
| 史前旱地土 P-03 Prehistoric upland soil P-03 | | | | | |
| A | 88~103 | 0 | 5.97 | 13.98 | 17.9 |
| B1 | 103~130 | 0 | 5.85 | 13.53 | 12.4 |
| B2 | 130~155 | 0 | 5.75 | 13.30 | 18.5 |
| C | 155~180 | 0 | 6.01 | 13.30 | 18.3 |

对绰墩遗址发现的史前水稻田土壤全剖面的观测研究表明^[7-9],史前水稻土剖面已有 A(耕作层)、Ap(犁底层)、B(心土层)和 C(母质层)的分异。而且已经有黏粒的淋洗淀积,即从表层淋洗后向亚表层淀积,而同时期非水稻土则无此现象(表 1)。

对绰墩遗址 P-01 土壤剖面的土壤磁化率的测定表明^[12],剖面上出现两个埋藏的水稻土: 130 ~ 100 cm (6 280 a BP), 90 ~ 40 cm (3 300 a BP)和表层的现代水稻土: 37 ~ 0 cm (宋朝以来), 因此土壤磁化率有三次由高逐渐下降的趋势,与有机质含量的消长却呈相反的规律(图 2 根据文献[12]改画)。表明这里有两次史前的和一次现代的水稻土成土过程。在经常淹水条件下,强磁性矿物(磁铁矿和磁赤铁矿)发生了还原分解,变成弱磁性的纤铁矿、针铁矿碳和无定型氧化铁,导致土壤磁化率降低。

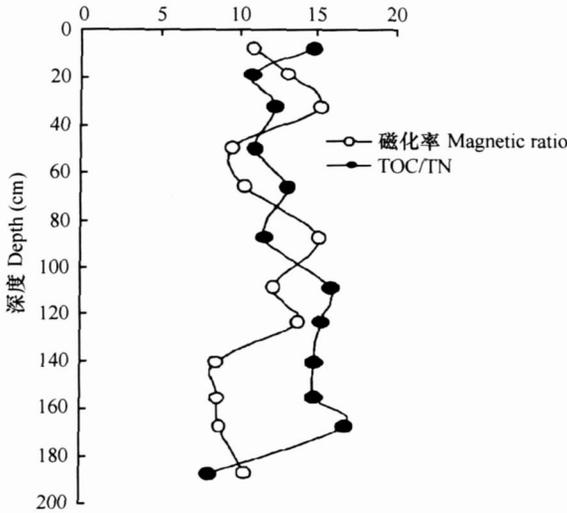


图 2 绰墩遗址 P-01 剖面土壤磁化率 ($10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) 与 TOC/TN 随深度变化曲线^[12]

Fig.2 Magnetic ratio ($10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) and TOC/TN changes along soil profile depth of P-01^[12]

对绰墩遗址的史前水稻田的表土层孢粉和水稻植硅体的分析表明,在水稻植硅体浓度较高的史前稻田与现代水稻田的孢粉学特征具有一定相似性:禾本科花粉(水稻)占主要优势,但其他水生植物花粉(如香蒲等)含量则很少。这说明先民在水稻种植过程中已经有清除杂草的农事活动^[13]。对取自绰墩遗址出土的史前灌溉水稻田(编号为 S-25, S-27, S-30, S-46, S-49, S-51)表层土壤有机质进行固态¹³C核磁共振分析表明^[7],史前水稻土表层有机质主要是化学位移在 $\delta = 95 \sim 170$ 范围内的有机化合物,其中最强的峰值信号出现在 $\delta = 125$,

属于典型的烯烷基团或芳香族碳(图 3),所有田块的表层土壤有机质均有相似的¹³C核磁共振谱。说明其来源和组成的同一性。土壤中积累的有机碳主要是先民在收获稻穗后将稻草、稻秆和稻叶就地焚烧所残留,正是由于火烧后有机质成为烯烷基团或芳香族碳为主的有机碳(黑碳或腐殖化很高的胡敏素)才能使其长期持留在土壤中。这些于 6 290 a 前(新石器时期)形成的水稻田表层土壤有机质的含量高达 $21 \sim 23 \text{ g kg}^{-1}$,相当于或甚至略高于当地现代水稻土表层的有机质含量^[14-15]。史前水稻土有机质的¹³C核磁共振谱在 $\delta = 168$ 处还出现了峰值信号,应是典型的苯酸、苯甲酸、安息香酸类物质的羧基碳,表明在这样长期埋藏的条件下部分有机碳也被氧化了。

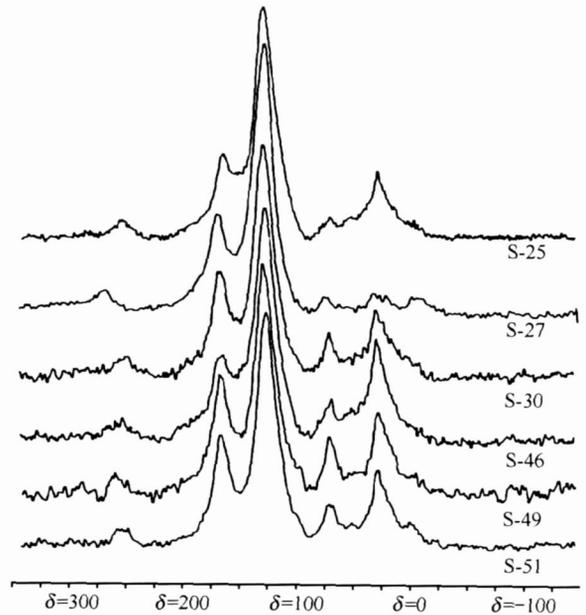


图 3 绰墩遗址出土的史前水稻田表层土壤有机质的固态¹³C核磁共振谱(未发表数据)

Fig.3 Solid state ¹³C NMR spectra of prehistoric paddy soils in Chuodun Site (Unpublished data)

归纳上述,本文提出了一套鉴别古水稻土和古水稻田的土壤学诊断技术:

- a. 发现有栽培的碳化稻谷;或每克土中应有 5 000 颗以上的水稻植硅体;
- b. 土壤剖面上有黏粒淋洗和淀积;
- c. 土壤剖面有特征性磁化率的变化;
- d. 表层有特征性土壤孢粉谱;
- e. 表层土壤有机质有特征性的核磁共振谱;
- f. 田块有田埂、灌溉渠道、灌溉工具及水源等。

在埋藏的土层中发现有碳化稻粒,或者在每克土中鉴定出 5 000 颗以上的水稻植硅体,两者均说明这里曾经有水稻或旱稻种植;如在土壤剖面上能鉴定出有黏粒向下移动,那就能证明确实是水稻,因只有在长期淹水耕作条件下才有黏粒向下淋洗移动的条件。土壤磁化率的测定结果能进一步证明是淹水导致的磁化率逐渐下降的轨迹;特征性的土壤孢粉谱是古今水稻土共同的(详见本文 2.2 节);若有条件对埋藏土层中土壤有机质进行核磁共振谱的测定,那么本文发表的核磁共振谱对于史前水稻农作来说是唯一性的。只要符合上述诊断条件中前三条(即 a, b, c),或者其中的 a, d 或 a, e 这两条就均能证明有埋藏水稻土的存在。至于埋藏的古水稻田则只要有 a 和 f 两条就能证明其存在,而如果再有 d 和 e 两条的佐证,则对古代耕作方法也就有更多的了解。

2.2 “火耕水溲 原始稻作技术的科学证据

绰墩遗址出土的史前灌溉稻田表层(100~116 cm)的土壤有机质的核磁共振谱表明其芳香族有机碳占 70%左右(图 3),古稻田剖面中发现焚烧稻草的灰炕和残留的碳化稻粒、黑碳等^[6-9,13]是先民“火耕”的遗物遗迹;焚烧秸秆时既清洁了田面、便于下个季节的种植,同时也将大部分杂草烧死;而史前稻田表层土壤孢粉谱以水稻孢粉“一统天下”的特点^[13],则是先民年复一年的“水淹”将大部分旱生杂草淘汰——“水溲”的证据。我国汉代的古籍如《史记》、《汉书·武帝本记》、《盐铁记》等早有记“楚越之地,地广人稀,饭稻羹鱼,或火耕而水溲”^[12],当然这不是说火耕水溲仅从汉代才有的,而是从远古就开始了。

因为“火”与“水”两种力量是自然赋予人类的

礼物,有了水与火加上骨耜、木耜或石耜这些简单的原始工具就能农作了,例如水稻成熟时用手或骨镰收获稻穗^[11],然后在田间用火将稻草、水生杂草秸秆和种子一起焚烧,这就是所谓“火耕”,以便使来年土壤肥沃、种植方便,同时还杀灭了水生杂草^[8-11]。春天直播或用骨耜点播稻种前,引水淹田,使土壤表层软化,以脚踏或驱牛入田“踏耕”^[11],在稻苗生长期间田间维持一定深度的淹水层,为水稻生长发育创造好的环境条件,也可以抑制或杀灭旱生杂草的生长,这就是所谓“水溲”。只是因为中国南方迄今还没有发现史前留下的文字记载,而直至秦朝统一中国以后才有记载罢了。过去对这种原始的农作技术一直缺乏有力的证据。本研究运用史前土壤有机质的核磁共振谱和史前稻田表层孢粉分析技术将留在土壤中的这个重要信息给提取出来了,印证了 Blum^[14]指出的“土壤具有人类文明信息记忆块和考古文物储存库的功能”的观点。

2.3 史前水稻土的全磷和有效磷含量

研究了史前水稻土、现代水稻土和古泥沼肥力状况的异同(表 2)。埋藏的史前水稻土表层有机质、全氮、全钾与现代水稻土表层的接近或略低,现代水稻土表层速效氮和可溶性碳含量却远高于埋藏的史前水稻土,这既是由于现代水稻土施入的是新鲜氮肥、有机肥的结果,也与史前水稻土有机质是火烧后的残留物及高度芳香化的结构和长期埋藏时的高度腐殖化有关。全磷和有效磷则是史前水稻土的远高于现代水稻土的,说明古代先民在农田中曾使用过大量的动物残留物肥田,这与国际上对古旱地土壤的研究结果是一致的^[3]。

表 2 史前水稻土、现代水稻土和古泥沼的一些基本性质^[9]

Table 2 Comparison of chemical properties among prehistoric, present paddy soils and top layer of prehistoric wetland^[9]

| 项目 Items | pH | 有机碳 OC | 全氮 TN | 全磷 TP | 全钾 TK | 可溶性碳 速效氮 有效磷 速效钾 | | | |
|---|-----|-----------|-----------------------|----------|----------|------------------------|-------|------|-------|
| | | | | | | SOC | AN | AP | AK |
| | | | (g kg ⁻¹) | | | (mg kg ⁻¹) | | | |
| 史前水稻土 (n=5) Prehistoric paddy soils (n=5) | | | | | | | | | |
| | 5.7 | 20.3 | 2.1 | 1.58 | 18.2 | 89.5 | 10.8 | 48.0 | 167.7 |
| 现代水稻土 (n=7) Present paddy soils (n=7) | | | | | | | | | |
| | 4.8 | 21.4 | 2.3 | 0.91 | 17.1 | 206.5 | 191.0 | 9.2 | 139.3 |
| 史前古泥沼 (n=3) Prehistoric wetland top soils (n=3) | | | | | | | | | |
| | 5.6 | 5.8 | 0.6 | 0.75 | 17.7 | 61.6 | 11.2 | 34.2 | 117.0 |

古泥沼是未种植过水稻的与史前水稻土同代、同源(下蜀黄土)、同层次(100~116 cm)的低洼湿地(土壤中水稻植硅体为零的沟渠或水塘中的黑色淤泥),可以认为是史前水稻土直接的母质。因此对两者的比较有助于认识人类早期稻作农业对土壤质量发育演变的影响,具有土壤学的理论意义。表2的结果显示,古泥沼的养分含量除全钾与史前水稻土接近外(全钾含量在一定种植时间内变化不会很大),其余的如有机质、全氮、全磷、有效磷、速效钾等均低于史前水稻土,说明先人粗放的耕作活动对水稻土土壤肥力的培育已经有显著的影响。特别需要指出的是,史前水稻土的有机质含量远高于史前古泥沼,说明即使是在6000 a前原始稻作农业状态下人为的耕作活动也是水稻土较自然湿地能储存更多的有机碳^[7~9, 15, 16]。

2.4 古水稻土中存在多环芳烃(PAHs)等有机污染物

新石器时期史前水稻土剖面中也发现有较高含量的PAHs有机污染物,达 $56.0 \mu\text{g kg}^{-1}$,其中以2~3环的萘和菲最多(占91%),而4环以上的含量很低^[17~19]。特征化合物分子比值Phe/Ant和BaA/Chr土壤有机质¹³C-NMR谱图以及稻草秸秆焚烧试验均证明了古土壤中PAHs污染物主要源自先人焚烧稻草秸秆——“火耕”这一耕作习惯。而同时期相邻旱地土壤及母质层中PAHs仅为 $32.0 \sim 36.9 \mu\text{g kg}^{-1}$,2~3环的各占63%和60%左右^[17~19]。证明古土壤中的有机质是以焚烧稻草秸秆等的残留物为主,而焚烧稻草的模拟实验结果也表明烟气中的多环芳烃(PAHs)也是以2~3环的低分子量的Ace、Nap、Phe、Flu等为主,灰烬中也以低分子量的PAHs为主,与史前水稻土中PAHs的测定结果相吻合。证明了史前水稻土中这些PAHs主要来源于稻草的焚烧,其中有少量也可能是还原条件下的生物自然合成的^[17~19]。

历史上森林、草地等陆地生态系统由于各种自然原因如:雷电打击、火山爆发、物体碰撞摩擦(如陨石坠落)、极端高温天气等引发的火灾等,之后也必将在土壤中留下多环芳烃(PAHs)等各种有机污染物,再加上自然条件下土壤生物的合成、转化等生物地球化学过程可产生各种有机物,即使没有人类活动的干扰自然界中也会有部分有机污染物存在,只是其数量和强度是因地、因时而异的。

2.5 灌溉稻田和水渍人为土的固碳潜力

同期、同源(下蜀黄土)、同层次(100~116 cm)

的旱地土壤(P-03),是以水稻植硅体含量为零、旱地杂草及蔬菜旱作等十字花科孢粉为绝对优势、黄棕色为特征的土壤^[6~9, 13],与史前水稻土土壤肥力质量的比较见表3。

表3 古水稻土与同期、同源、同层次旱地土壤肥力质量比^[9]

| Table 3 Comparison properties of prehistoric paddy soil and non-paddy soil | | | |
|--|------------------------|-----------------|--------------------|
| 项目 | 古水稻土 | 古旱地土壤 | 差异% |
| Items | Prehistoric paddy soil | Non-paddy soils | Percent difference |
| 水稻植硅体 Rice opal(No. g^{-1}) | 105 159 | 0 | 100 |
| 阳离子交换量 CEC | 28.21 | 26.48 | +6.1 |
| 有机碳 Org·C(g kg^{-1}) | 12.88 | 8.07 | +37.3 |
| 全氮 TN(g kg^{-1}) | 1.02 | 0.70 | +31.4 |
| 全磷 TP(g kg^{-1}) | 4.55 | 2.45 | +46.2 |
| 全钾 TK(g kg^{-1}) | 17.2 | 21.8 | -26.7 |
| 全硫 TS(mg kg^{-1}) | 169.8 | 98.9 | +41.8 |
| 有效磷 Avail. P(mg kg^{-1}) | 54.05 | 45.55 | +15.7 |
| 速效钾 Avail. K(mg kg^{-1}) | 115.9 | 226.8 | -48.9 |
| 有效硫 Avail. S(mg kg^{-1}) | 51.72 | 34.56 | +33.2 |
| C/N比 C/N ratio | 12.6 | 11.5 | +8.7 |

种植水稻后土壤有机质较旱地土壤的提高37%,全氮、全磷和全硫分别提高31%、46%和41%,有效磷和有效硫分别提高16%和33%,说明所有这些生命元素均因种植水稻、灌溉施肥而提高。唯有全钾和速效钾分别下降了27%和49%。说明长期的灌溉水稻的农业活动对于钾素的消耗(水稻的吸收和收获移出及灌溉水的排放和渗漏迁移)是相当大的。当时除了食用动物的残留物做肥料以补充磷素和氮素外,不可能有钾素的投入,只有随着收获的稻谷移出土壤,仅靠焚烧稻草是不能完全循环补充钾素的。现代的稻作农业,尽管使用了大量的钾肥,仍然出现大面积钾素亏缺的土壤^[15],这是因为有更大量的稻草和稻谷都随收获移出土壤。

由于稻田是人工湿地生态系统^[15],史前水稻土与现代水稻土一样均较古代或现代的旱地土壤储存着更大量的有机质,而且是随着种植年限的延长,水稻土有机质的腐殖化程度就越高,有机碳也就越加稳定^[16]。而且当水稻土表层的有机质趋于一定生态环境的最大容量以后,水稻土亚表层、心土层中土壤有机质含量也逐渐提高,本项目研究的初步结果表明在深达1 m的土壤剖面中有机质含量

随着水稻种植年限的不断延长,下部土层(约60 cm以下)中有机碳的 ^{13}C 值不断下降,上下土层间有机碳 ^{13}C 值的差异也不断减小,随着水稻种植年限的增加,因种植水稻(C-3作物)而带入的年轻的 ^{13}C 值较低的有机碳不断向下层迁移并固定起来。本研究结果揭示了即使耕种上千年后仍具有碳汇效应,而旱地土壤迄今还没有发现有这种特性。可见,灌溉稻田生态系统的固碳潜力值得更加深入的研究和广泛地利用。

2.6 史前水稻土的甲烷排放潜势和硝化功能

产生甲烷是水稻土的典型性质之一,与表层的现代水稻土(P-01, 0~15 cm)相比,地下埋藏的史前水稻土的甲烷排放潜势均很弱。这与史前水稻土长期埋藏在地下,一方面是产甲烷古菌群落的物种多样性指数和丰富度指数均有下降,这种优势种群数量的减少是产甲烷潜势趋于减少的直接原因。另一方面由于史前水稻土中的有机质都是腐殖化程度很高的胡敏素和芳香度很高的有机碳,所以产甲烷潜势很弱^[20~23]。

就硝化作用而言,无论是加入 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 还是不加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的情况下,古水稻土培养体系中 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 累积量没有明显的变化,而且很低,说明在长期的地下埋藏以后,这些古水稻土已经失去了硝化功能^[23],说明经过长期的厌氧过程,好氧的硝化细菌几乎已经全部死亡^[20~23]。

不仅是史前水稻土的低甲烷排放潜势和硝化功能的缺失,初步的结果也已经显示随着水稻种植年限的延长,水稻土的甲烷排放潜势和硝化功能也随之下降,也即越是利用年代久远的稻田甲烷排放量越少,释放氮氧化物的能力越低。显然这也是稻田生态系统可持续利用,对生态环境具有保护作用的优点之一,值得进一步深入探讨。

3 研究展望

前期的研究工作取得了一批创新性的成果,不仅发掘鉴定了埋藏的5 000 a、6 000 a和7 000 a前新石器时期的水稻田和古水稻土,阐明了史前水稻土的物理、化学、生物学和生物地球化学的一些特性。同时还发现了一组在相同母质、相同生态条件以及相同耕作制度下发育的具有50、100、300、500、700、1 000和2 000 a不同植稻年龄的水稻土序列(Chronosequences)。引起了国内外同行的关注,表示了合作研究的兴趣。项目研究组首先与德国7所大学

和马普学会下属的研究所组成的团队共同申请了一项德中合作的DFG研究项目——水稻土发育演变过程中的生物地球化学过程研究。

今后的研究除了需要继续与考古部门合作到长江三角洲以外的区域(国内外)去发掘鉴定和研究不同年代的古水稻田和古水稻土外,还要加强与地理学家、地质学家和气候学家的合作,研究不同年代的气候变化对水稻土形成发育的影响及土壤性质对气候变化的反馈。完成专著《中国灌溉稻田和古水稻土的起源与演化》的撰写,确立我国稻作农业对世界文明发展的贡献,揭示水渍人为土演化的过程与机理。同时还要与德国和其他国家对古水稻土研究有兴趣的科学家密切合作,研究史前、古代、现代水稻土演化的生物地球化学机制。首先要开展下列研究:

1) 水稻土演化过程中由氧化还原条件引起的矿物组成变化

评价水稻土氧化还原电位对矿物组成及其相关土壤溶液组成的影响。通过比较分析一组不同时间序列的土壤,包括近代的盐碱湿地、50~2 000 a的水稻土、3 000 a以上的埋藏水稻土及6 000 a前的史前水稻土,明确(1)矿物的风化、转化及形成速率,(2)有机质对风化过程及土壤溶液组成的影响,(3)铁氧化物、黏土矿物及植硅体对土壤碳固定的贡献。而研究的重点是水稻植硅体对水稻土溶液中的硅和碳固定的影响及植硅体的生物可利用性。

2) 水稻土中氧化还原条件控制的与矿物相关的有机质固定机理

建立水稻土中有机质稳定过程机制及理论,鉴定并定量分析水稻土中的稳定性有机质组分,阐明水稻植硅体、碳化有机质(黑碳)和有机质-矿物复合体之间强烈的化学过程对有机质稳定性的贡献。揭示长期水稻种植对土壤有机质稳定性,特别是对稳定性有机质含量和组成的影响。

3) 水稻土中依赖于氧化还原的可溶性有机质的产生与固定

研究氧化还原条件对水稻土中DOM产生及稳定性的影响。研究水稻土亚土层中DOM被铁氧化物及黏土矿物吸附或共沉淀的固定作用及对氧化还原条件的依赖性。揭示长期水稻种植对土壤可溶性有机质含量和组分、矿物集合以及土壤溶液化学组成的影响。

4) 水稻土发育过程中氧化还原控制下氨基酸氮的循环以及通过氨基酸定年

更好地了解现代、古代及史前水稻土中有机氮在系统内的循环。通过分析特定化合物(土壤氨基酸)中 ^{13}C 、 ^{14}C 丰度来阐明有机氮(SON)在不同时间尺度下的转化。并通过示踪D丙氨酸的 ^{14}C 指纹来测定细菌残体内积累的碳年龄。

5) 水稻土中参与碳氮循环的微生物群落

分析长期种植水稻下微生物多样性与微生物功能多样性随时间的变化,重新构建古水稻土、史前水稻土中碳氮循环的微生物生态过程。利用分子生物学技术(DGGE和T-RFLP)研究不同种植年限的水稻土中以及对照海相沼泽土中的细菌、古菌、固氮菌、硝化细菌、反硝化细菌、氨氧化细菌、铁还原细菌、产甲烷菌和甲烷氧化菌的群落结构及多样性,从而揭示海相沼泽转变为稻田后人为影响和淡水淹水条件引起的土壤微生物结构和功能上的变化,揭示长期种植水稻对微生物群落结构的影响。

6) 水稻土中脂类化合物和多环芳烃(PAHs)

通过分析史前、古代和现代水稻土及不同种植年限序列水稻土中作为水稻和各种微生物分子标记物的脂类物质,确定来源于水稻有机质的脂肪组分与比例,来自微生物有机质的脂肪组分与比例,以及水稻土中因焚烧秸秆而残留的PAHs等有机污染物的量,从而揭示随水稻种植年限的增加,细菌、真菌和藻类残体在水稻土有机质演化中的重要贡献,探索能指示埋藏古水稻土水稻种植的脂肪类分子标记物。

致谢 本文主要是根据国家自然科学基金重点项目(40335047)的研究成果进行综述的,参加该项目的成员有中国科学院南京土壤研究所的杨林章、林先贵、胡正义、董元华、章钢娅、尹睿、庄舜尧、翁解萍等,以及苏州市博物馆的丁金龙,昆山市文物保护管理所的赵坤元,苏州市农业环境监测站的王梅农,浙江省农业科学院的符建荣,浙江省文物考古研究所的郑云飞,浙江省慈溪市农业局土肥站的陆宏,浙江省嘉兴市农业局土肥站的黄锦法,南京农业大学的代静义、李福春,扬州大学的殷士学等各位同事的大力协助,对此表示衷心的感谢;同时还要对博士后李久海、李春海等以及其他许多博士和硕士研究生的积极工作表示感谢。没有大家的支持和友谊就不会有这些成绩。

参考文献

- [1] Vanessa S. Ancient soil methods impress modern science and help climate. <http://environmentalresearchweb.org/cws/article/future/3243>. 2008, Jan 15
- [2] Johnson K D, Terry R E, Jackson M W, *et al*. Ancient soil resources of the Usumacinta River Region, Guatemala. *Journal of Archaeological Science*, 2007, 34(7): 111 ~ 129
- [3] Dahms D E. Reconstructing paleoenvironments from ancient soils: A critical review. *Quaternary International*, 2007, (51/52): 58 ~ 60
- [4] 赵其国. 第十八届国际土壤学大会综述. *土壤*, 2007, 39(1): 2 ~ 18. Zhao Q G. A review on the ISSS: 18th World Congress of Soil Sciences (In Chinese). *Soils*, 2007, 39(1): 2 ~ 18
- [5] 龚子同, 刘良梧, 张甘霖. 苏南昆山地区全新世土壤与环境. *土壤学报*, 2002, 39(5): 618 ~ 626. Gong Z T, Liu L W, Zhang G L. Holocene soils and environment in Kunshan region, south Jiangsu (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(5): 618 ~ 626
- [6] 丁金龙. 长江下游新石器时代水稻田与稻作农业的起源. *东南文化*, 2004, 2: 19 ~ 23. Ding J L. Origin of Neolithic paddy fields and rice farming in lower reaches of Yangtze River (In Chinese). *Southeast Culture*, 2004, 2: 19 ~ 23
- [7] Cao Z H, Ding J L, Hu Z Y, *et al*. Examination of ancient paddy soils from the Neolithic Age in China's Yangtze River Delta. *Naturwissenschaften*, 2006, 145(1): 35 ~ 40
- [8] 曹志洪, 杨林章, 林先贵, 等. 缙墩遗址新石器时期水稻田、古水稻土剖面、植硅体和碳化稻形态特征的研究. *土壤学报*, 2007, 44(5): 838 ~ 847. Cao Z H, Yang L Z, Lin X G, *et al*. Morphological characteristics of paddy fields, paddy soil profile, and fossil rice grain of the Neolithic Age in Yangtze River Delta (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5): 838 ~ 847
- [9] Lu J, Hu Z Y, Cao Z H, *et al*. Characteristics of soil fertility of buried ancient paddy at Chuodun site in Yangtze River Delta. *Agricultural Sciences in China*, 2006, 5(6): 441 ~ 450
- [10] Greenland D J. *The Sustainability of Rice Farming*. London: CAB International Publication in Association with the International Rice Research Institute, 1998. 23 ~ 28
- [11] 游修龄编著. *中国稻作史*. 北京: 中国农业出版社, 1995. 204 ~ 205. You X L. ed. *History of Rice Culture in China* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1995. 204 ~ 205
- [12] 杨用钊, 李福春, 金章东, 等. 缙墩遗址中存在全新世水稻土的新证据. *第四纪研究*, 2006, 36(5): 864 ~ 871. Yang Y Z, Li F C, Jin Z D, *et al*. The new evidence of Neolithic paddy soils in Chuodun Relic Site (In Chinese). *Journal of Quarterly Research*, 2006, 36(5): 864 ~ 871
- [13] Li C H, Zhang G Y, Yang L Z, *et al*. Pollen and phytolith analyses of ancient paddy fields at Chuodun site, the Yangtze River Delta. *Pedosphere*, 2007, 17(2): 209 ~ 218
- [14] Blum W E H. Sustainable land use as basis for soil resources conservation. In: Cao Z H. ed. *Soil, Human and Environment Interaction*. Beijing: China Sciences & Technology Press, 1998. 3 ~ 12
- [15] 曹志洪, 林先贵编著. *太湖流域土-水间的物质交换与水环境质量*. 北京: 科学出版社, 2006. 75 ~ 77, 99 ~ 117, 321 ~ 322. Cao Z H, Lin X G. eds. *Materials Exchanges between Soils and Water System and Its Affect on the Environmental Quality of Waters in Taihu Lake Region* (In Chinese). Beijing: Scienci Press, 2006. 75 ~ 77, 99 ~ 117, 321 ~ 322
- [16] Dai J Y, Ran W, Xing B S, *et al*. Characterization of Fulvic acid fraction obtained by sequential extraction with pH buffers

- water and ethanol from paddy soils *Geoderma*, 2006, 135: 284 ~ 295
- [17] 李久海,董元华,曹志洪,等. 古水稻土中多环芳烃的分布特征及其来源判定. *环境科学*, 2006, 27(6): 1 235 ~ 1 239. Li J H, Dong Y H, Cao Z H, *et al* Distribution characteristics of PAHs in ancient paddy soils and judgment of its origin (In Chinese). *Chinese Journal of Environmental Science*, 2006, 27(6): 1 235 ~ 1 239
- [18] 李久海,董元华,曹志洪,等. 6000年以来水稻土剖面中多环芳烃的分布特征及来源初探. *土壤学报*, 2007, 44(1): 41 ~ 46. Li J H, Dong Y H, Cao Z H, *et al* Distribution and origin of PAHs in a soil profile containing 6000a old paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 41 ~ 46
- [19] Dong Y H, Cao Z H, Li J H, *et al* Molecular ratio of PAHs as a tool to reveal ancient farming practice from paleo-paddy soils in the Yangtze River Delta of China. In: ISSS ed Proceeding of 18th World Congress of Soil Sciences Philadelphia, Pennsylvania, USA. 2006
- [20] 申卫收,尹睿,林先贵,等. 绰墩山遗址古水稻土的一些微生物学特性研究. *土壤学报*, 2006, 43(5): 814 ~ 820. Shen W S, Yin R, Lin X G, *et al* Characteristics of soil microbiology of ancient paddy soils at Chuodun site (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 814 ~ 820
- [21] 胡君利,林先贵,栢海燕,等. 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. *土壤学报*, 2007, 44(2): 280 ~ 287. Hu J L, Lin X G, Chu H Y, *et al* Effects of rice cultivation on microbial functional diversity in ancient and present paddy soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 280 ~ 287
- [22] 胡君利,林先贵,栢海燕,等. 古水稻土与现代水稻土的供氮差异及其氮肥效应. *土壤学报*, 2007, 44(3): 556 ~ 560. Hu J L, Lin X G, Chu H Y, *et al* Different nitrogen supply capacities and nitrogenous fertilizer efficiencies in ancient and present paddy soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3): 556 ~ 560
- [23] 胡君利,林先贵,栢海燕,等. 古水稻土与现代水稻土硝化活性的比较. *土壤学报*, 2005, 42(6): 1 044 ~ 1 046. Hu J L, Lin X G, Chu H Y, *et al* Comparison between ancient and present paddy soils in nitrifying activities (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6): 1 044 ~ 1 046

STUDY OF PREHISTORIC IRRIGATED PADDYS AND ANCIENT PADDY SOILS IN CHINA

Cao Zhihong

(State Key Laboratory of Soils and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract Rice cultivation in China can be dated back 7 000 years ago, it produces about 40% rice grain and occupies 23% of paddy soils worldwide respectively. Rice is one of the staple foods for Chinese. Comparison study on soil quality of prehistoric, ancient and present paddy soils, to reveal the origin, evolution of irrigated paddy fields and paddy soils in biogeochemistry process as well as the mechanisms of sustainability of irrigated rice paddy ecosystem is very important in theory for soil sciences and to promotion food security of our world, this should be one of the priority area for Chinese soil scientists may make great contribution to it.

The Neolithic paddy fields discovered in Chuodun Relic Site has been proved as the earliest (6 280 a BP) irrigated paddy field in earth. An integrated set of diagnosis stands for prehistoric irrigated paddy fields and soils has been established. It has fund the scientific proves for "ploughing with fire and weeding with flooded water"—an early paddy field management technology at Neolithic age in China. It is similar in SOM, TN and TK but much higher TP and AP in surface layer of prehistoric paddy soil than present paddy soils, indicated that long term use of animal residues as native fertilizer in rice cultivation since Neolithic Age. And higher SOM in all of prehistoric and present paddy soils than in upland soils of same age and native wetland, revealed the great potential of carbon sequestration in paddy soil ecosystem. Certain level of organic pollutants such as PAHs was fund in prehistoric paddy soil and was much higher than in prehistoric upland soil nearby and proved that it was originated from the burning of rice straw in field after rice harvest. Soil microbiological study results showed that methane production potentials were minimum in prehistoric paddy soils and it had no nitrification function at all which resulted the big changes of biodiversity in microbe community and functions between prehistoric and present paddy soils. Further study in this area are discussed as well.

Key words Origin of irrigated paddy fields; Early paddy soil management; Characteristics of prehistoric paddy soils; C sequestration potentials of paddy soil