

# 江苏省如皋市土系及其生产性能和生态环境特征\*

王虹<sup>1,2</sup> 黄标<sup>1†</sup> 孙维侠<sup>1</sup> 胡文友<sup>1</sup> 赵永存<sup>1</sup> 龚子同<sup>1</sup>

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(中国科学院南京土壤研究所),南京 210008)

(2 中国科学院研究生院,北京 100049)

**摘要** 以江苏省如皋市为例,在收集第二次土壤普查资料和已有的研究成果基础上,经过野外土壤观察和调查、土壤基本理化性质和微量元素性质分析,进行了该市土系划分及其生产性能和生态环境特征的研究。研究确定了土系划分的原则和依据、特征土层等,划分出9个土系。各土系土壤基本理化和微量元素性质的差异很好地验证了土系划分的可靠性。各土系在颗粒组成、化学性质、养分性质、微量元素含量等方面均具有显著差异,反映出各土系独特的生产性能和生态环境特征。

**关键词** 土系;基层分类;如皋市;生产性能;生态环境特征

**中图分类号** S159 **文献标识码** A

土系是土壤分类的支柱,也是与生产应用和生态环境评价相结合的桥梁。我国的土壤系统分类研究从20世纪80年代中期至今已建立了完善的高级分类单元,即土纲、亚纲、土类、亚类。因此,有步骤地建立中国土壤系统分类的基层单元显得尤为重要<sup>[1]</sup>。土系与土壤利用管理及农业生产密切相关。

现阶段,在吸取国内外土壤分类经验的基础上,我国土壤基层分类单元的研究已取得了显著成果,部分省市已建立了有关土系划分理论和方法的专著<sup>[2-5]</sup>。例如,龚子同等<sup>[4]</sup>学者在以诊断层和诊断特性为基础的高级分类单元的基础上,全面阐述了土壤基层分类单元的划分,按照土系划分的原则和方法,结合土壤发生形成的原理、属性差异将海南岛土壤划分出80个土系,明确了每一个土系的生境条件、主要性状、理化性质和利用特点等。自1996年之后,很多土壤学家对一些省份的部分土壤进行了土系划分的研究<sup>[6-14]</sup>,陆续发表了一些地方性土壤基层分类的文献。朱安宁等<sup>[12]</sup>通过对河北省栾城县土壤全面调查,确定了特征土层,划分出16个土系,初步明确了各土系的基本属性与区域分布。还有一些土壤学家采用类似的分类方法对某一特定土壤类型进行了土系的研究<sup>[15-20]</sup>。此外,一些土壤学家<sup>[21-24]</sup>对已划分出的土系的基本性状及

其生产应用进行了一些相关研究。全国范围内的土系研究已逐步展开。但是,目前系统地、全面地研究土系划分及生产性能和生态环境特征的研究尚不多见。

本文以江苏省如皋市为例,在收集第二次土壤普查资料<sup>[25]</sup>和已有的研究成果基础上<sup>[26-30]</sup>,根据中国土壤系统分类研究的成果<sup>[31]</sup>,对该地区的土壤进行土系划分,确定划分土系的依据与方法,明确各土系分布状况;通过大量野外采样和实验室土壤性质分析,详细评价各土系的生产性能和生态环境特征,以期为该市及类似地区土系划分、土壤管理与农业生产提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区自然条件与成土特点

如皋市地处北纬32°00'~32°30',东经120°20'~120°50'之间。总面积1593 km<sup>2</sup>,其中耕地面积8.25 × 10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>。气候上,属于北亚热带湿润季风性气候区。年均温14.6℃,年均降雨量1060 mm。全年降水主要集中在六月下旬至九月上旬<sup>[25]</sup>,具有日照充足、气候温和、雨量充沛、光热水高峰基本同季的气候特征。

该市位于长江三角洲冲积平原上,地势平坦,

\* 国家科技基础性工作专项(2008FY110600)和中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA05050503)资助

† 通讯作者,E-mail:bhuang@issas.ac.cn

作者简介:王虹(1986—),山东济宁人,硕士研究生,主要从事土壤发生分类及土壤地球化学研究。E-mail:wangh@issas.ac.cn

收稿日期:2011-08-22;收到修改稿日期:2011-11-16

由北向南、由西向东稍有倾斜。土壤成土母质由江淮古冲积物(I)、浅湖相沉积物(II)和长江新冲积物(III)3部分组成(图1)。江淮古冲积物分布于中部和北部地区。由于成土时间较长,冲积物中已无明显沉积层理,有明显的石灰淋溶淀积现象。地表冲积物质的质地,自西向东、自南向北呈由粗到细。在地势较高的地方常有一层壤质层,其出现的深度

不同。在质地较砂、地势较高的地方,由于地下水位相对较低,水分不易饱和,相对水分状况较差。分布于东西两侧的浅湖相沉积物是江淮古冲积物在地势较低的地方搬运再沉积形成的。因此,其质地较江淮古冲积物要黏。长江新冲积物分布于沿江圩田和沙洲,富含石灰,淋溶不明显。质地有粗有细,有时表土以下有冲积层理残留。

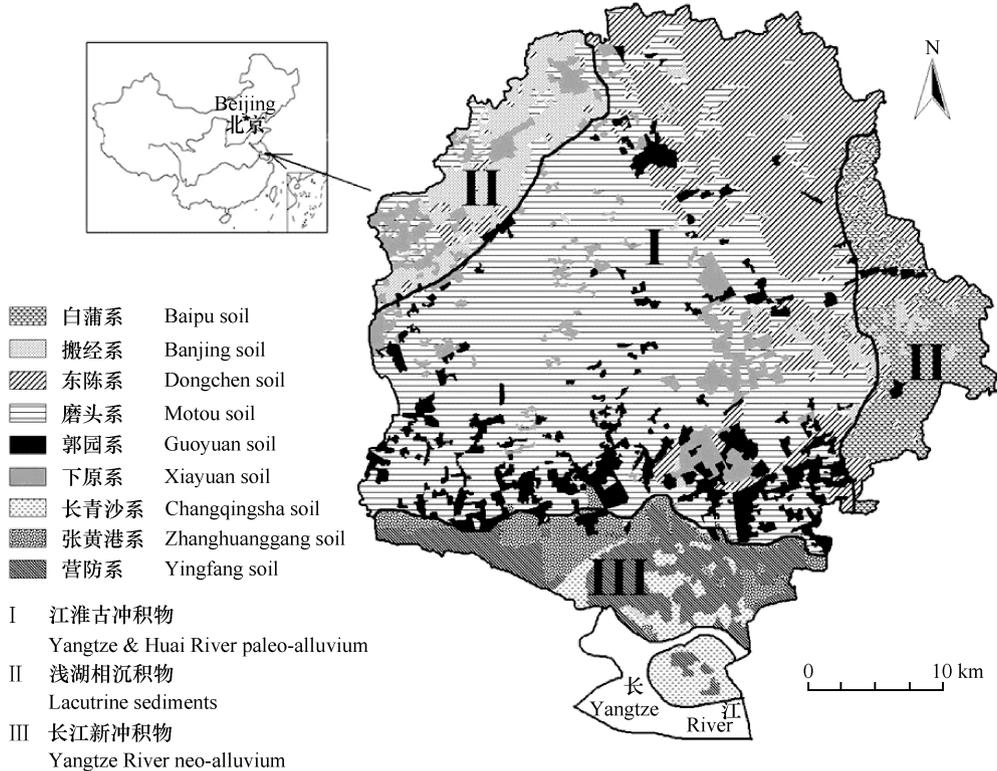


图1 江苏省如皋市母质和土系分布图

Fig.1 Distribution of soil series and their parent materials in Rugao County, Jiangsu Province

全市大部分地区,多年来主要以农业生产为主导产业,工业并不发达,作物种类较多,以小麦、水稻、玉米和油菜为主,近年来随着种植结构的调整,苗木、桑蚕、蔬菜、瓜果种植面积明显增加<sup>[29]</sup>。

## 1.2 土壤观察、采样、分析

在收集第二次土壤普查资料的基础上,先后在研究区域内,野外观察剖面35个,对剖面进行了详细的形态学描述。同时,采集了代表不同土壤类型和农业生产管理方式的区域性表层土壤样品168个。采集的土壤样品在室温下风干、研磨,根据分析的要求,分别过10目、60目和100目尼龙筛。土壤样品的分析包括:土壤基本化学性质:pH、有机质(OM)、全氮、全磷、全钾、有效磷(碳酸氢钠提取态)、速效钾(醋酸铵提取态)<sup>[32]</sup>;土壤有效态微量元素:有效铜、铁、锰、锌、镍、钴(DTPA提取态,等离

子光谱法测定)<sup>[32]</sup>,有效硼(热水提取态,比色法测定)、氟(热水提取态,电极法测定)、硒(热水提取态,原子荧光法测定)、有效钼(草酸-草酸铵提取态,比色法测定)<sup>[32]</sup>,土壤全量微量元素:铅、锌、铜、钴、镍、锰、铬、钒(X荧光光谱法测定)<sup>[32]</sup>。分析过程中通过样品重复、空白样和标准样品进行质量控制。

## 1.3 数据统计方法

聚类分析方法被用于根据土壤性质聚类土壤样品。方差分析方法被用于统计不同土壤母质间、不同土系间各种性质的差异显著性。所有方法均运用统计软件SPSS16.0进行运算;由于第二次土壤普查资料中土壤颗粒组成采用中国制,本文研究在收集该资料的基础上,利用Matlab软件将其转换为美国制<sup>[33]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤诊断性状和土壤高级分类

**2.1.1 土壤诊断性状** 经过野外剖面观察,结合《如皋县土壤志》<sup>[25]</sup>中的相关资料,根据中国土壤系统分类的诊断层、诊断特性和诊断现象的判断标准<sup>[34-35]</sup>,如皋市土壤具有以下诊断性状:

**诊断层:**(1)水耕表层:由于长期淹水耕作、水旱轮作发育而成,有明显的耕作层和犁底层。(2)水耕氧化还原层:出现在水耕表层以下,厚度大于20 cm,普遍出现锈纹锈斑和铁锰结核。以上两个诊断层主要出现于东部的浅湖相沉积物发育的土壤内(图1)。(3)雏形层:在大于土表之下25 cm内,有弱块状结构发育,土壤质地为壤质或极细砂,甚至有的为黏质的土层,土壤剖面中表层石灰反应明显弱于底层,有程度不等的碳酸盐下移现象。本区大部分土壤具有此诊断层。(4)暗沃表层:上部大于25 cm土层颜色较暗,平均有机碳含量大于 $6 \text{ g kg}^{-1}$ ,盐基饱和,土体主要呈粒状结构。这类诊断层主要出现在如皋市北部(江淮古冲积物)和西北地区(浅湖相沉积物)。(5)淡薄表层:该诊断层与暗沃表层基本相似,只是表层25 cm深度范围内土壤有机碳低于 $6 \text{ g kg}^{-1}$ 。此诊断表层主要出现于该市的中部和南部地区。

**诊断特性:**主要有氧化还原特性,是土壤在季节性水分饱和状况下,土壤发生氧化还原交替作用而形成的,本区大部分土壤的心土、底土部位,或上部土体中具此特征。此外,本区土壤还具有湿润土壤水分状况、潮湿土壤水分状况、热性土壤温度状况、石灰性以及盐基饱和度等诊断特性。

**诊断现象:**如皋市土壤存在水耕现象,在水旱轮作条件下,有一段时间土壤具人为滞水水分状况的特征,但主要由于植稻时间较短,水耕作用影响较弱。此诊断现象在该市东部、北部地区土壤中经常可见。

**2.1.2 土壤高级分类** 根据野外采样调查,按中国土壤系统分类中的高级类别检索,并结合如皋市长期人为活动中土壤利用对土壤的影响,全市土壤共划分出2个土纲、3个亚纲、4个土类、4个亚类(表1)。

**人为土:**此类土壤具有水耕表层和水耕氧化还原层,氧化还原层呈棱块状结构,结构面上有明显的胶膜,结构内有褐色的铁锰斑点。经高级分类单

元检索出普通筒育水耕人为土1个亚类。

**雏形土:**此类土壤中存在雏形层,有潮湿和湿润2种土壤水分状况,可分为潮湿雏形土和湿润雏形土2个亚纲。潮湿雏形土根据暗沃表层和淡薄表层的存在检索出暗色潮湿雏形土和淡色潮湿雏形土2个土类。再根据暗色潮湿雏形土中有水耕现象,可检索出水耕暗色潮湿雏形土1个亚类,根据淡色潮湿雏形土中有石灰性,可检索出石灰淡色潮湿雏形土1个亚类。在湿润雏形土中未发现其他诊断性状,只检索出普通筒育湿润雏形土1个亚类(表1)。

### 2.2 土壤基层分类

**2.2.1 土族的划分** 在明确亚类分类单元的基础上,一般土族级单元的划分是按地区性成土因素或土壤利用管理所引起的土壤重要理化性质分异来进行,将有利于后续土系的系统划分<sup>[13]</sup>。我国已有的研究成果表明<sup>[36]</sup>,土族单元主要是根据土族控制层段内土壤颗粒大小级别、矿物学及土壤温度级别等来划分的,这些级别标准均已明确规定,并已日益普及推广应用。

如皋市地处暖温带,年平均土温为 $16.3^{\circ}\text{C}$ 至 $16.4^{\circ}\text{C}$ ,具有热性土壤温度状况。成土母质主要由冲积物和浅湖相沉积物组成, $<2 \text{ mm}$ 土壤颗粒矿物类型为云母型、混合型和云母混合型, $<0.002 \text{ mm}$ 土壤颗粒矿物类型为水云母型<sup>[36]</sup>。按土族划分要求,土壤细土部分的质地确定为砂质、壤质、黏质颗粒大小级别<sup>[36]</sup>。这样,如皋市土壤在各亚类级别下可划分6个土族单元(表2),用以进行各土系的系统划分。

**2.2.2 土系的划分** 土系划分的原则和依据:土系划分的对象是土壤实体,应以土壤属性为依据,划分的指标应相对明确、相对独立存在与稳定,这样才能适用于大比例尺土壤调查制图,服务于生产实践,而且适于土壤的信息管理<sup>[10]</sup>。因此,基于这样的原则,仔细分析如皋市的成土因素可发现,如皋市成土母质分布明确(图1),质地和沉积构造特征明显(1.1节)。同一成土母质内,土壤质地也存在差异,且江淮古冲积物中,近地表范围内出现一层特殊的壤质层。因地形和微地貌的不同,还可影响土壤的水分状况。最终确定选取沉积构造、土壤颜色、土壤质地、特征土层作为土系划分的依据,此外这些依据均相对稳定,与土壤利用关系也较为密切。这些依据随土壤类别不同而有所差异,但同一土族内划分土系的依据应当一致,仅表现在量度指标上的差异<sup>[10]</sup>。

表 1 如皋市土壤高级分类单元

Table 1 High level soil taxons for soil classification in Rugao County

土纲 Order	亚纲 Suborder	土类 Group	亚类 Subgroup
人为土 Anthrosols	水耕人为土 Stagnic Anthrosols	筒育水耕人为土 Haplic-Stagnic Anthrosols	普通筒育水耕人为土 Typic Haplic-Stagnic Anthrosols
锥形土 Cambosols	潮湿锥形土 Aquic Cambosols	暗色潮湿锥形土 Dark Aquic Cambosols	水耕暗色潮湿锥形土 Anthrostagnic Dark Aquic Cambosols
		淡色潮湿锥形土 Ochri-Aquic Cambosols	石灰淡色潮湿锥形土 Calcaric Ochri-Aquic Cambosols
	湿润锥形土 Udic Cambosols	筒育湿润锥形土 Haplic-Udic Cambosols	普通筒育湿润锥形土 Typic Haplic-Udic Cambosols

控制层段和划分指标:由于研究区母质深厚,考虑影响土壤农业利用的最大深度,将控制层段确定在地表向下深至 110 cm<sup>[34-36]</sup>。对水耕人为土而言则确定在诊断表下层的下部边界。同时,确定在土族相同的情况下,土系划分按照土壤质地的不同、明度和彩度的高低、控制层段内沉积层理的发育与否和土体内特征土层的出现作为划分土系的标准。

**2.2.3 主要土系** 根据上述土系划分的原则和依据以及土体控制层段内特征土层的发育程度,全市土壤划分出 9 个土系(表 2)。并将各土系与原土种志的典型剖面特征按上述步骤确定各自所属的土系,将原土种分布图重新制图,获得如皋土系分布图(图 1)。

首先,是发育于浅湖相沉积物上的白蒲系和搬经系。

**白蒲系:**其所属土族是壤质云母型热性普通筒育水耕人为土。分布于如皋市东部至东南部地区,由浅湖相沉积物发育而成,质地相对较细,成土时间较长,受长期水耕耕作熟化,定向培肥耕作等因素影响,土壤的发生层次与锥形土相比产生了明显的变化,已发育为水耕人为土。

**搬经系:**其所属土族是壤质混合型热性水耕暗色潮湿锥形土。分布于如皋市西北部地区,亦由浅湖相沉积物发育而成,仅发育锥形层,土壤表层颜色偏暗,有机质含量较高。在水旱轮作条件下,有一段时间土壤具有人为滞水水分状况特征。

其次,是发育于江淮古冲积物上的东陈系、磨头系、郭园系和下原系。

**东陈系:**其所属土族是壤质混合型热性水耕暗色潮湿锥形土,与搬经系属于同一土族。二者分开的依据是,由于成土母质不同,导致东陈系有机质

含量相对较低,其明度和彩度要低于搬经系土壤。东陈系发育于如皋市的东北和东部地区的江淮冲积物上。但此处母质质地较细,与发育于浅湖相沉积物母质上的土壤并无明显差别,土壤的生产性能均要高于发育于同一母质上的其他 3 个土系。

**磨头系:**其所属土族是砂质云母混合型热性石灰淡色潮湿锥形土,质地较粗是其显著特点。面积较大,分布于如皋市的中部和中西部地区。

**郭园系:**其所属土族是砂质云母混合型热性普通筒育湿润锥形土。由于该土系土壤地形有一定的突起,加之质地较砂,不易保持水分,所以,属于湿润水分状况,以区别于其他 3 个土系。该土系零星分布于中部偏南地区,呈东西向的带状零星分布。

**下原系:**其所属土族也是砂质云母混合型热性石灰淡色潮湿锥形土,与磨头系属于同一土族。两者划分是依据特征土层出现与否。下原系土壤剖面中,表层以下,出现了一层厚度不等、质地较细的壤质层。该壤质层在土壤剖面中出现的深度不同,但形态特征一致,没有明显的区别,加之该土系分布面积不大,仅在中部磨头系土壤中零星分布,所以本次土系划分并未将它们区分开,而是归为一类作为同一个土系。

最后,是发育于长江新冲积物上的长青沙系、张黄港系和营防系。三者呈镶嵌状分布。

**长青沙系:**其所属土族是黏质水云母型热性石灰淡色潮湿锥形土。是如皋市内发育年龄较短的一类土壤,土壤质地偏向轻黏土,富含石灰。主要分布在如皋市的南部地区,土壤中黏粒含量较两个土系稍高。

**张黄港系:**其所属土族是壤质云母混合型热性石灰淡色潮湿锥形土。为质地较粗、形成时间较短的一类锥形土,土壤剖面 50 cm 范围内成土母质的

沉积层理清晰可辨,土壤中石灰基本没有移动。主要分布在如皋市的南部偏西一带,分布较局限。

营防系:其所属土族也是壤质云母混合型热性石灰淡色潮湿锥形土,与张黄港系属于同一个土族。两者划分的依据是两者在质地上有差异,营防系质地要比张黄港系偏黏些。主要成片分布在如

皋市南部沿长江的圩田和沙洲地区。

发育于长江新冲积物母质上的3个土系,有一共同的独特特性,即成土时间均非常短,垦殖利用时间不长,尽管土壤均达到锥形土的标准,但与上述磨头系和东陈系等锥形土相比,土壤发育仍然很弱,土体内原始沉积层理较清楚<sup>[26]</sup>。

表2 如皋市土壤土族、土系的划分

Table 2 Soil families and series in Rugao County

成土母质 Soil parent materials	土系 Soil series	土族 Soil family	特征土层、划分指标 Characteristic soil horizons, ranking index
浅湖相沉积物 Lacustrine Sediments	白蒲系 Baipu	壤质云母型热性普通筒育水耕人为土 Loamy Mica Thermic Typic Haplic-Stagnic Anthrosols	水耕表层、水耕氧化还原层 Anthro-stagnic epipedon, Hydragric horizon
	搬经系 Banjing	壤质混合型热性水耕暗色潮湿锥形土 Lomay Mixed Thermic Anthrostagnic Dark Aquic Cambosols	锥形层、暗沃表层、颜色 Cambic horizon, Mollic epipedon, Color
江淮古冲积物 Yangtze and Huai River Paleo-alluvium	东陈系 Dongcheng	壤质混合型热性水耕暗色潮湿锥形土 Lomay Mixed Thermic Anthrostagnic Dark Aquic Cambosols	锥形层、暗沃表层、颜色 Cambic horizon, Mollic epipedon, Color
	磨头系 Motou	砂质云母混合型热性石灰淡色潮湿锥形土 Sandy Mixed-mica Thermic Calcaric Ochri-Aquic Cambosols	锥形层、淡薄表层、质地 Cambic horizon, Ochric epipedon, Texture
	郭园系 Guoyuan	砂质云母混合型热性普通筒育湿润锥形土 Sandy Mixed-mica Thermic Typic Haplic-Udic Cambosols	锥形层、淡薄表层、质地 Cambic horizon, Ochric epipedon, Texture
长江新冲积物 Yangtze River Neo-alluvium	下原系 Xiayuan	砂质云母混合型热性石灰淡色潮湿锥形土 Sandy Mixed-mica Thermic Calcaric Ochri-Aquic Cambosols	锥形层、壤质层、淡薄表层 Cambic horizon, Loamy stratum, Ochric epipedon
	长青沙系 Changqingsha	黏质水云母型热性石灰淡色潮湿锥形土 Clay hydromica Thermic Calcaric Ochri-Aquic Cambosols	锥形层、质地、沉积层理 Cambic horizon, Texture, Strata
	张黄港系 Zhanghuanggang	壤质云母混合型热性石灰淡色潮湿锥形土 Loamy Mixed-mica Thermic Calcaric Ochri-Aquic Cambosols	锥形层、质地、沉积层理 Cambic horizon, Texture, Strata
	营防系 Yingfang	壤质云母混合型热性石灰淡色潮湿锥形土 Loamy Mixed-mica Thermic Calcaric Ochri-Aquic Cambosols	锥形层、质地、沉积层理 Cambic horizon, Texture, Strata

### 2.3 土系划分的可靠性验证

土系划分的依据很多<sup>[36]</sup>,在具体划分时,不同的地区,不同的土壤类型所选取的指标也不完全相同。那么,根据以上原则和依据确定的土壤剖面形态学指标划分的土系是否合理,有必要进行检验。本文认为检验的标准应该是以划分的土系是否具有相同的生产性能和生态环境特征,即是否具有类似的土壤基本理化和微量元素性质。由于研究区的3种母质性质和分布特征非常明显,因此,本文在对区域样点根据土壤基本理化和微

量元素性质聚类时,分别按各样点所属母质和土系进行了聚类。

对发育在江淮古冲积物上的土系而言(由于样品数较多,图形篇幅很大,故未列出),大部分磨头系和东陈系样点分别聚在了一起,郭园系和下原系并未发现有明显聚集,这可能与郭园系的划分是以土壤水分状况有关,土壤水分状况并未明显改变土壤的理化和微量元素性质。而下原系的划分是以土体中壤质层的出现为标准,该壤质层出现在表下层,因此对表层土壤的性质影响较小。

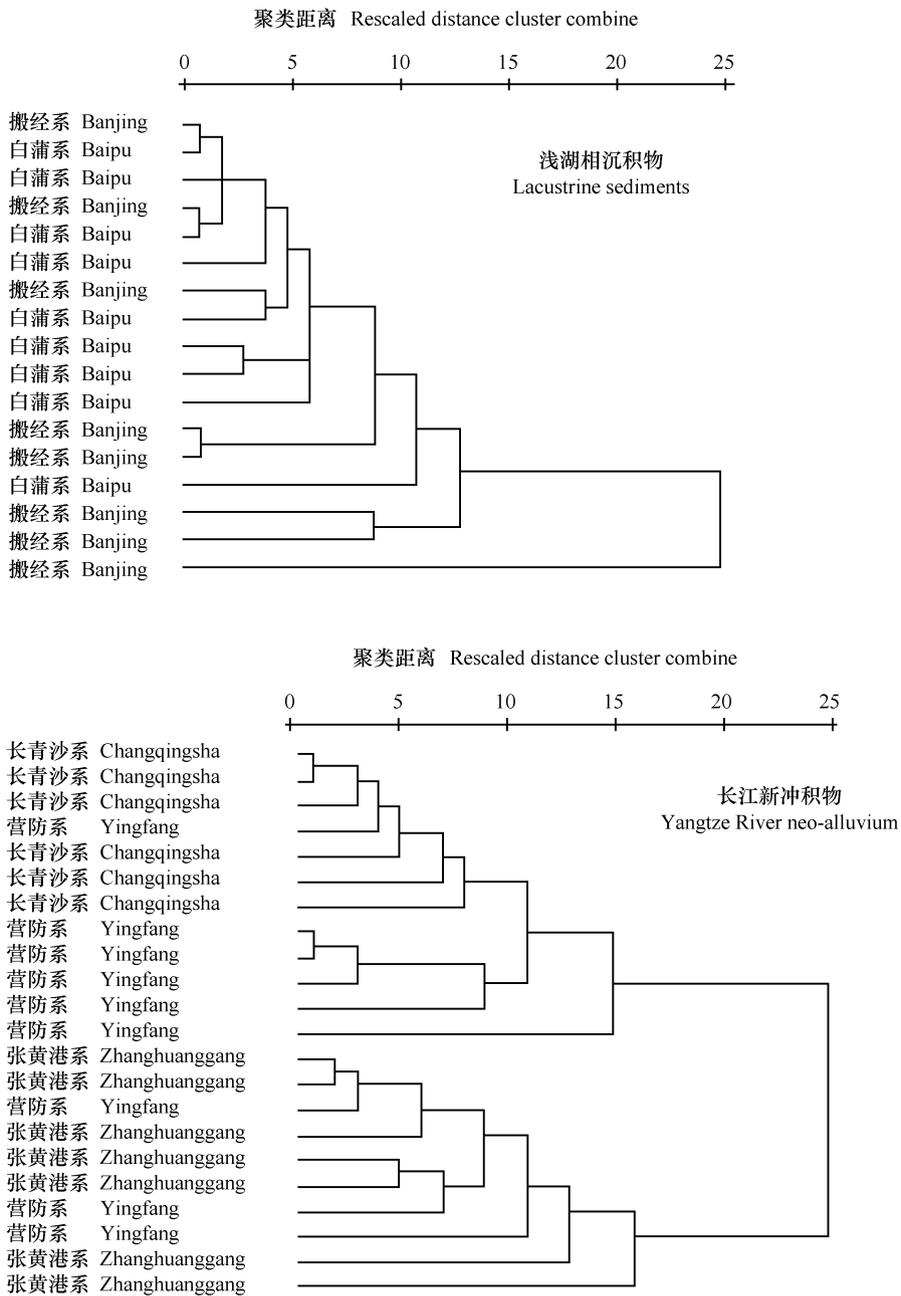


图 2 发育于浅湖相沉积物和长江新冲积物上土壤样点的聚类分析树状图

Fig. 2 Cluster analysis dendrograms of the soil sample sites developed from lacustrine sediments and neo-alluvium of the Yangtze River

发育于浅湖相沉积物上的土系能明显分出两类(图 2),即在聚类距离为 10 处,土壤样点反映的白蒲系和搬经系明显聚集在一起。发育于长江新冲积物上的土系亦被明显地聚集在一起(图 2),在聚类距离为 20 处,营防系和长青沙系聚为一类,张黄港系聚为一类。而在聚类距离为 10 处,营防系和长青沙系又分别聚集在一起。以上的聚类结果验证了分布在本文划分的土系上的样点具有类似土壤性质,同时也验证了土系划分确定的特征土层、

划分指标可靠性较高。

### 2.4 土系的生产性能与生态环境特征

土系与外界景观条件紧密联系,与农业生产实践相结合,各土系间因其物理、化学和微量元素性质的差异,导致其生产性能和生态环境特征具有多样性。了解土系的生产性能与生态环境特征对指导农业生产与管理具有重要意义。

**2.4.1 土系生产性能特征** 土壤物理性质是决定土壤耕作性能和土壤水分状况的重要指标。由

于研究区母质物理性质特征明显,所以,将不同母质上样点进行方差分析,可以看出母质对土壤砂粒和黏粒含量有明显影响。如黏粒的平均含量,长江新冲积物 > 浅湖相沉积物 > 江淮古冲积物,但仔细分析各土系表明,即使同一成土母质,颗粒组成还是有差异的,同样发育在江淮古冲积物上的磨头、郭园、下原 3 个土系砂粒含量较高要高于东陈系。发育在长江新冲积物上的张黄港系要明显高于营防系和长青沙系,而黏粒含量正好大致相反(表 3)。土壤物理性质基本由土壤母质决定,除长青沙系以外,整体偏砂,土壤耕作性能较好,但保水性能相对较弱。

从土壤的化学性质看,土壤呈碱性,有机质、全氮和磷素水平处于中等水平,而钾素水平偏低(表 3)<sup>[37]</sup>。土壤 pH 在 3 种母质间存在一定差异,长江新冲积物 > 江淮古冲积物 > 浅湖相沉积物( $p < 0.05$ ),但是,长江新冲积物和浅湖相沉积物母质上不同土系间土壤 pH 差异不大( $p > 0.05$ ),而江淮古冲积物母质上不同土系间土壤 pH 有一定差异( $p < 0.05$ ),下原系土壤 pH(8.03)最小。土壤有机质含量依然受母质影响,长江新冲积物和浅湖相沉积物发育的土壤显著高于江淮古冲积物( $p < 0.05$ ),其中,长青沙系(20.3 g kg<sup>-1</sup>)、营防系(17.8 g kg<sup>-1</sup>)和白蒲系(20.0 g kg<sup>-1</sup>)土壤有机质含量较高,高于其相同母质上的其他土系,发育在江淮古冲积物上的各土系,仅下原系稍高(15.8 g kg<sup>-1</sup>)。土壤全氮与土壤有机质的规律基本完全一致,也是长江新冲积物和浅湖相沉积物发育的土壤明显高于江淮古冲积物( $p < 0.05$ ),土系间也有一定差异( $p < 0.05$ ),其中,长青沙系(1.32 g kg<sup>-1</sup>)、白蒲系(1.26 g kg<sup>-1</sup>)、营防系(1.25 g kg<sup>-1</sup>)土壤全氮含量较高,磨头系土壤全氮含量(0.91 g kg<sup>-1</sup>)最低。

不同母质间、不同土系间的土壤全磷和速效磷的平均含量均无显著差异( $p > 0.05$ )。与土壤磷素状况不同,土壤钾素既受土壤母质影响,在相同母质的土系间也存在显著差异。全钾平均含量为长江新冲积物 > 浅湖相沉积物 > 江淮古冲积物( $p < 0.05$ )。发育在长江新冲积物母质上的长青沙系全钾量明显高于营防系再高于张黄港系( $p < 0.05$ ),而发育在江淮冲积物上的郭园系和磨头系全钾含量明显低于其他土系( $p < 0.05$ )(表 3)。土壤速效钾含量的变化与全钾不完全相同,整体而言,浅湖相沉积物发育的土壤,土壤速效钾含量明显高于江淮古冲积物和长江新冲积物,但后二者差异不显

著。在浅湖相母质上发育的白蒲系土壤速效钾含量(100 mg kg<sup>-1</sup>)明显高于搬经系,发育在江淮古冲积物上的磨头系土壤速效钾(47 mg kg<sup>-1</sup>)明显要低于其他几个土系。土系间的这些变化特征可能与土壤的利用有关,尽管白蒲系钾的储量低于长江新冲积物发育的土壤或接近相同母质发育的搬经系,但长期的水旱轮作的熟化明显提高了土壤的供钾能力,导致土壤速效钾含量明显提高。

土壤中有效态的微量元素是作物生产所需养分的主要来源,也是土壤生产性能的重要指标。根据土壤微量养分供应能力和作物对微肥的效应,参照省内外常用的分级标准<sup>[38]</sup>,如皋市与作物生长有关的微量元素相对较为丰富,土系之间变化受土壤母质影响较为明显(表 4)。

土壤有效铜的平均含量为 2.6 mg kg<sup>-1</sup>,绝大部分土壤的有效铜含量大于 2 mg kg<sup>-1</sup>的最高养分含量,处于较高的养分水平,母质对有效铜含量的影响表现为长江新冲积物 > 浅湖相沉积物 > 江淮古冲积物,长江新冲积物母质上发育的几个土系间差异显著,显然与母质的质地相关,即母质越黏,有效铜含量越高。土壤有效铁的平均含量为 33 mg kg<sup>-1</sup>,平均含量远远超过了高养分等级(10 mg kg<sup>-1</sup>),与有效铜不同,母质对有效铁的影响不甚明显,似乎发育在江淮古冲积物母质上的土系有效铁含量少些。土壤有效锰的平均含量为 13.2 mg kg<sup>-1</sup>,平均处于中等水平(7~15 mg kg<sup>-1</sup>),母质对土壤有效锰的影响与有效铜十分相似,表现为长江新冲积物 > 浅湖相沉积物 > 江淮古冲积物,且结构较粗的张黄港系土壤有效锰含量低于其他两个发育在同一个母质上的土系。土壤有效锌的平均含量 0.88 mg kg<sup>-1</sup>,处于中等偏低的养分水平,有 13% 左右的样点在较低的养分水平上(0.25~0.5 mg kg<sup>-1</sup>),母质对土壤有效锌的影响不是特别明显,在白蒲系、搬经系和东陈系土壤上含量较高,考虑到土壤有效锌对土壤 pH 变化的敏感性<sup>[39]</sup>,土系间的这种变化应与土壤 pH 变化有关(表 3)。土壤有效镍的变化与土壤有效锌几乎完全一致。

土壤有效钼的平均含量 0.18 mg kg<sup>-1</sup>,对豆科植物属于中等养分水平(0.15~0.20 mg kg<sup>-1</sup>)<sup>[40]</sup>,但有约 25% 的土壤样点处于低养分水平(<0.15 mg kg<sup>-1</sup>),部分样点甚至低于很低养分水平。母质对土壤有效钼的影响似乎不明显,各土系之间仅见发育在同一个土壤母质上的东陈系明显高于磨头系土壤(表 4)。土壤有效硼的平均含量 0.87 mg kg<sup>-1</sup>,绝大部

表 3 如皋市各土系表层和剖面样点土壤主要理化性状

Table 3 Physical and chemical properties of the soil series in Rugao County

土系 Soil series	颗粒组成 Particle size compositions(%)		pH (H <sub>2</sub> O)	有机质 OM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	有效磷 Available P	速效钾 Available K			
	2~0.02 mm	0.02~0.002 mm								(mg kg <sup>-1</sup> )		
	<0.002 mm											
白蒲系(15) Baipu	56.21	30.11	13.68	8.00b	20.0a	1.26a	0.84a	16.2cd	14.2a	100a		
搬经系(15) Bajing	62.78	25.69	11.54	8.22ab	16.9bc	1.05c	0.85a	16.6bc	20.5a	69bcd		
东陈系(45) Dongchen	60.38	27.32	12.30	8.26ab	16.4bc	1.05c	0.84a	16.0cd	19.3a	72bc		
磨头系(62) Motou	70.87	20.48	8.65	8.31a	14.0c	0.91c	0.80a	15.2e	9.0a	47d		
郭园系(19) Guoyuan	68.20	22.72	9.08	8.33a	14.7c	0.94c	0.92a	15.1e	18.3a	50cd		
下原系(15) Xiayuan	68.00	22.69	9.31	8.03b	15.8bc	1.08bc	0.80a	15.7de	12.2a	69bcd		
长青沙系(9) Changqingsha	4.44	74.19	21.37	8.34a	20.3a	1.32a	0.87a	18.7a	10.2a	82ab		
张黄港系(13) Zhanghuanggang	56.91	30.65	12.45	8.40a	16.9bc	1.07bc	0.88a	15.8de	10.1a	46d		
营防系(10) Yingfang	33.96	49.74	16.30	8.41a	17.8ab	1.25ab	0.85a	17.1b	8.9a	59cd		

注:颗粒组成粒级制采用美国制,其中2~0.02 mm为砂粒,0.02~0.002 mm为粉粒,<0.002 mm为黏粒;土系名称后括号内数字表示样品个数。同一列内小写字母相同的表示土系间未达到  $p = 0.05$  水平上的显著性差异。下同 Note: The particle size compositions used in the table is based on the American system, particles of 2~0.02 mm in size is defined as sand, 0.02~0.002 mm as silt, and <0.002 mm as clay; The figure in the brackets after the name of each soil series is the number of sampling sites; Means followed by the same letter in each column are not significant in difference at  $p = 0.05$  by Duncan's multiple range test. The same below

表 4 如皋市各土系表层土壤有效态微量元素含量  
Table 4 Soil available trace elements in various soil series in Rugao County

土系 Soil series	有效铜	有效铁	有效锰	有效锌	有效镍	有效钼	有效硼	水溶态氟	水溶态硒
	DTPA-Cu	DTPA-Fe	DTPA-Mn	DTPA-Zn	DTPA-Ni	Available Mo	H <sub>2</sub> O-B	H <sub>2</sub> O-F	H <sub>2</sub> O-Se
(mg kg <sup>-1</sup> )									
(μg kg <sup>-1</sup> )									
白蒲系(10) Baipu	2.70d	28.9bc	13.9ab	0.97a	0.16a	0.18ab	1.04a	4.75a	2.56a
搬经系(10) Banjing	2.65d	34.3a	13.6bc	0.98a	0.14b	0.17ab	0.99b	4.67b	2.36bc
东陈系(40) Dongchen	2.39e	33.1a	13.3bcd	0.94a	0.13c	0.19a	1.03a	4.66a	2.48ab
磨头系(58) Motou	2.35e	34.3a	12.7d	0.87b	0.12d	0.16b	0.93c	4.44b	2.22cd
郭园系(14) Guoyuan	2.20e	31.9ab	13.0cd	0.81c	0.12d	0.18ab	0.89de	4.42b	2.09d
下原系(12) Xiayuan	2.20e	33.1a	12.6d	0.87b	0.12de	0.17ab	0.92cd	4.38b	2.13d
长青沙系(7) Changqingsha	4.75a	28.1c	14.4a	0.82b	0.11e	0.20a	0.82f	4.72a	2.10d
张黄港系(8) Zhanghuanggang	3.36c	32.0ab	13.7b	0.80c	0.11e	0.18ab	0.92cd	4.86a	2.04d
营防系(9) Yingfang	4.03b	29.4bc	14.4a	0.81bc	0.11e	0.21a	0.89e	4.85a	2.16d

分土壤属于中上水平, 仅见 5% 的土壤样点小于一般农作物的临界值(0.5 mg kg<sup>-1</sup>)。母质对土壤有效硼的影响也表现出明显的规律, 即浅湖相沉积物 > 江淮古冲积物 > 长江新冲积物, 这一规律与土壤有效锌较为类似, 主要受母质的酸碱性影响。

综上所述, 如皋市土壤中有效态的微量元素铜、铁均达到很高的养分等级, 锰、硼则处于中上养分水平, 而锌、钼处于中下水平, 仍有一定面积的土壤存在缺乏风险。土壤中这些微量元素含量的变化主要受土壤母质的黏粒含量和酸碱度影响, 导致各土系间土壤微量影响元素产生变异。

**2.4.2 土系生态环境特征** 土壤中微量元素氟和硒等元素的有效性含量是反映区域环境质量的重要参数<sup>[41-42]</sup>, 它们过量或缺乏, 还可以通过食物链影响人类健康。如皋市土壤水溶性氟的平均含量为 4.58 mg kg<sup>-1</sup>, 变幅 1.24 ~ 9.28 mg kg<sup>-1</sup>, 其含量要明显高于类似地区土壤水溶性氟的含量<sup>[43]</sup>, 但对研究区地下水氟含量的测定结果表明<sup>[44]</sup>, 其含量(0.3 mg kg<sup>-1</sup>) 远低于我国地氟病发生区的地下水氟含量水平(>1 mg kg<sup>-1</sup>), 究其原因, 可能是本文的土壤水溶性氟的测定是采用热水溶液提取, 故含量偏高, 所以研究区并无地方性氟中毒的危险, 但在含量特别高的区域应给予重视。土壤水溶性氟含量在各土系间的变化在一定程度上也受土壤母质影响, 主要表现为长江新冲积物和浅湖相沉积物土壤水溶性氟含量要大于江淮古冲积物母质上发育的土壤(表 4)。土壤水溶性硒的平均含量为 2.27 μg kg<sup>-1</sup>(表 4), 变幅为痕量 ~ 7.57 μg kg<sup>-1</sup>, 变异较大, 在土系之间的变化受母质的酸碱性影响较

大, 土壤 pH 与土壤水溶态硒达到显著的负相关<sup>[30]</sup>, 主要表现为浅湖相沉积物发育土壤水溶性硒含量高于江淮古冲积物, 再高于长江新冲积物。

土壤中一些重金属如铅、锌、铜、铬等元素的全量, 一直以来被作为关键指标进行土壤环境状况的评价<sup>[45]</sup>。表 5 列出了研究区各土系中重金属元素含量, 从表中的结果看, 如皋市土壤中全铅、全锌、全铜、全钴、全镍、全锰、全铬、全矾的平均含量分别为 20、60、24、12、28、523、61、84 mg kg<sup>-1</sup>。且各元素变异系数均在 20% 以下, 对照国家土壤环境质量标准中铅、锌、铜、铬自然环境土壤的背景值(GB-15618-1995), 如皋市土壤重金属元素均未超过背景值, 考虑到其他元素与这些元素之间紧密的地球化学关系<sup>[45]</sup>, 出现异常的可能性也不大, 所以, 研究区土壤环境不存在重金属元素的生态环境风险。各个土系间土壤重金属全量变化呈现出一致的规律性, 3 种母质间差异显著, 长江新冲积物 > 浅湖相沉积物 > 江淮古冲积物( $p < 0.05$ )。相同母质不同土系间, 在长江新冲积物上发育的各土系间平均值差异显著, 而浅湖相沉积物和江淮古冲积物上的各土系间的平均值无显著差异。

综上所述, 如皋市土壤整体生态环境状况较优, 且目前人为的活动并未造成土壤生态环境状况发生明显变化, 土壤微量元素及重金属含量状况, 依然保持着良好的生态环境状况, 存在生态环境污染的风险很小, 在经济发展较快的当代实属不易, 尽管这样, 保护土壤生态环境还是应给予高度的重视, 在土壤利用方面, 注意保护, 做到可持续发展, 将这块难得的净土保持下去。

表 5 如皋市各土系表层土壤的全量微量元素含量

Table 5 Total trace elements in soil series in Rugao County

土系 Soil series	全铅	全锌	全铜	全钴	全镍	全锰	全铬	全矾
	Total Pb	Total Zn	Total Cu	Total Co	Total Ni	Total Mn	Total Cr	Total V
	(mg kg <sup>-1</sup> )							
白蒲系(10) Baipu	20cd	59c	22d	12c	27c	444de	61c	80c
搬经系(10) Banjing	19cde	59c	22cd	12c	28c	498cd	60c	81c
东陈系(40) Dongchen	18de	52d	18e	9.8d	23d	400ef	56d	72d
磨头系(58) Motou	16e	48d	17e	9.4d	23d	401ef	55d	69d
郭园系(14) Guoyuan	17e	49d	18e	9.5d	22d	409ef	55d	70d
下原系(12) Xiayuan	18de	51d	18e	9.9d	24d	352f	56d	72d
长青沙系(7) Changqingsha	29a	85a	42a	18a	41a	934a	76a	121a
张黄港系(8) Zhanghuanggang	21c	61c	25c	12c	28c	571c	61c	86c
营防系(9) Yingfang	24b	72b	33b	15b	34b	713b	67b	102b

### 3 结 论

根据土系划分的原则和依据,选取土壤母质、质地、特征土层的种类及排列组合作为分类指标,如皋市土壤可分出 9 个土系。根据对覆盖整个如皋市大量土壤表层样点各种土壤性质进行的聚类分析,验证了土系划分原则和依据的可靠性,表明了平原地区土壤母质、质地和特征土层等指标在土系分类中的重要作用。

整体而言,如皋市土壤偏碱性、质地偏砂,土壤有机质、全氮、全磷、有效磷均属中等养分水平,微量元素中铜、铁有效性很高,锰、硼则处于中上养分水平,而锌、钼处于中下水平,仍有一定面积的土壤存在缺乏风险。与生态环境相关的土壤微量元素也较为适中,重金属元素未见超过土壤自然背景值的情况,因此,不存在明显的影响人体健康和生态环境的风险。各土系土壤在生产性能和生态环境特征上存在明显变异,变异产生的原因,对土壤肥力和养分性质而言,主要是受母质及人为利用熟化

过程影响,而微量元素则主要受母质的质地和酸碱度影响,正因为这些因素的影响,使得研究区各土系具有独特的生产性能和生态环境特征。

另一方面,该市第二次土壤普查过程中划分出的 26 个基层土种单元,似乎过于细化了。根据土体构型中某些特征层次厚度大小划分出的土种,其表层土壤在物理化学性质、生产性能和生态环境特征等方面并没有显著的差异。将其合并而划分的土系既简便又实用,各自具有独特的生产性能和生态环境特征,完全可用于指导各土系的利用和管理。可见,本文的土系划分既可以在土壤分类系统中找到其分类位置,又在农业生产与区域生态环境建设的应用中更具有实用性。

### 参 考 文 献

- [1] 张甘霖,等. 土系研究与制图表达. 合肥:中国科学技术大学出版社,2001:46—64. Zhang G L, et al. Soil series and mapping (In Chinese). Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001: 46—64
- [2] 王庆云,等. 湖北省土系概要. 武汉:湖北科学技术出版社,1997. Wang Q Y, et al. The general characteristics of soil series

- in Hubei Province (In Chinese). Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1997
- [ 3 ] 章明奎, 等. 浙江省土系概论. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Zhang M K, et al. The general characteristics of soil series in Zhejiang Province (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [ 4 ] 龚子同, 张甘霖, 漆智平. 海南岛土系概论. 北京: 科学出版社, 2004. Gong Z T, Zhang G L, Qi Z P. The general characteristics of soil series in Hainan Island (In Chinese). Beijing: Science Press, 2004
- [ 5 ] 张之一, 等. 黑龙江省土系概论. 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2006. Zhang Z Y, et al. The general characteristics of soil series in Heilongjiang Province (In Chinese). Harbin: Harbin Map Publishing House, 2006
- [ 6 ] 张洪业. 山东省高塘县土壤基层分类及应用研究探讨. 土壤, 1999, 31(2): 77—83. Zhang H Y. Soil basic categories and applications in Gaotang County, Shandong Province (In Chinese). Soils, 1999, 31(2): 77—83
- [ 7 ] 杜国华, 张甘霖, 龚子同. 淮北平原样区的土系划分. 土壤, 1999, 31(2): 70—76. Du G H, Zhang G L, Gong Z T. Soil series classification in Huaibei case area (In Chinese). Soils, 1999, 31(2): 70—76
- [ 8 ] 顾也萍, 吕成文, 刘付程, 等. 安徽宣城样区土系的划分. 土壤, 2001, 33(1): 7—12. Gu Y P, Lv C W, Liu F C, et al. Soil series classification in Xuancheng case area, Anhui Province (In Chinese). Soils, 2001, 33(1): 7—12
- [ 9 ] 魏孝孚, 章明奎, 厉仁安. 浙江衢县样区土系的划分. 土壤, 2001, 33(1): 26—30. Wei X F, Zhang M K, Li R A. Soil series classification in Quxian case area, Zhejiang Province (In Chinese). Soils, 2001, 33(1): 26—30
- [ 10 ] 黄金良. 闽东南漳浦样区的土系划分与土地利用. 土壤, 2001, 33(1): 22—25. Huang J L. Soil series classification and application in Zhangpu case area, southeast of Fujian Province (In Chinese). Soils, 2001, 33(1): 22—25
- [ 11 ] 尹力初. 江苏省江宁县淳化样区土壤系统分类中基层分类的研究. 南京: 南京农业大学资源与环境科学学院, 2002. Yin L C. The research of soil series in the lower category of soil taxonomy in Chunhua soil sample area, Jiangning County, Jiangsu Province (In Chinese). Nanjing: College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, 2002
- [ 12 ] 朱安宁, 张佳宝, 张玉铭. 栾城县土系划分及其基本性状. 土壤, 2003, 35(6): 476—480. Zhu A N, Zhang J B, Zhang Y M. Classification and basic properties of soils in Luancheng County (In Chinese). Soils, 2003, 35(6): 476—480
- [ 13 ] 蔡崇法, 胡泳海, 王庆云. 武汉市典型地区土系的研究. 土壤通报, 2003, 32(2): 49—52. Cai C F, Hu Y H, Wang Q Y. A study on soil series in a typical region of Wuhan (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2003, 32(2): 49—52
- [ 14 ] 陈松林, 陈健飞. 中国土壤系统分类在福建漳浦样区的应用. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2008, 24(2): 92—99. Chen S L, Chen J F. Application of Chinese soil taxonomy in Zhangpu soil sample area, Fujian Province (In Chinese). Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition, 2008, 24(2): 92—99
- [ 15 ] 何毓蓉, 杨昭琮, 陈学华, 等. 四川盆地西部灌口组(K<sub>2</sub>g)紫色雏形土的特征与分类. 山地学报, 1997, 17(1): 28—33. He Y R, Yang Z C, Chen X H, et al. Mouth of western Sichuan Basin irrigation group (K<sub>2</sub>g) characteristics and classification of purple Cambosols (In Chinese). Journal of Mountain Science, 1997, 17(1): 28—33
- [ 16 ] 沈汉, 李红. 肥熟旱耕人为土的性态分异与土族土系的划分. 土壤, 2001, 33(1): 32—37. Shen H, Li H. Fimi-orthic Anthrosols state differentiation and classification of soil series and soil families (In Chinese). Soils, 2001, 33(1): 32—37
- [ 17 ] 凌静. 四川盆地中部紫色土土系划分研究. 成都: 四川农业大学资源环境学院, 2002. Ling J. Study on soil series classification of the purple soils in Sichuan Basin (In Chinese). Chengdu: College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, 2002
- [ 18 ] 王振建. 成都平原主要水耕人为土土系划分研究. 成都: 四川农业大学资源环境学院, 2002. Wang Z J. Study on soils series classification of the main Stagnic Anthrosols in Chengdu Plain (In Chinese). Chengdu: College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, 2002
- [ 19 ] 宫阿都, 何毓蓉, 黄成敏, 等. 成都平原土壤系统分类典型土系划分. 西南农业学报, 2002, 15(1): 70—73. Gong A D, He Y R, Huang C M, et al. Soil typical series classification of Soil Taxonomy in Chengdu Plain (In Chinese). Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2002, 15(1): 70—73
- [ 20 ] 王振建, 刘孝宝, 唐永顺, 等. 水耕人为土土系划分指标选取研究——以成都平原主要水耕人为土为例. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2004, 26(3): 307—310. Wang Z J, Liu X B, Tang Y S, et al. Selection for classification factors on soil series of Stagnic Anthrosols—A case study on main Stagnic Anthrosols in Chengdu Plain (In Chinese). Journal of Southwest Agricultural University: Natural Science Edition, 2004, 26(3): 307—310
- [ 21 ] 周勇, 王庆云, 张海涛, 等. 湖北省土系的应用实践——以典型土系为例. 土壤, 1999, 31(2): 84—89. Zhou Y, Wang Q Y, Zhang H T, et al. Application of the soil series in Hubei Province (In Chinese). Soils, 1999, 31(2): 84—89
- [ 22 ] 何毓蓉, 宫阿都, 黄成敏, 等. 成都平原典型土系分类与其生产性和生态环境特征. 山地学报, 2001, 10(增刊): 36—41. He Y R, Gong A D, Huang C M, et al. Typical soil series classification with productive and ecological characteristics in Chengdu Plain (In Chinese). Mountain Journal, 2001, 10(Suppl): 36—41
- [ 23 ] 周红艺, 何毓蓉. 成都平原典型土系的分类在大比例尺土壤制图中的应用——以彭州样区为例. 西南农业学报, 2001, 14(增刊): 5—8. Zhou H Y, He Y R. Application of the taxonomic classification of typical soil series in Chengdu plain in mapping of soils on large scale—Taking Pengzhou County as an example (In Chinese). Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2001, 14(Suppl): 5—8
- [ 24 ] 漆智平, 易小平. 海南三江样区主要土系的基本性状. 热带农业科学, 2003, 23(3): 14—17. Qi Z P, Yi X P. The basic

- traits of main soil series in Hainan Sanjiang sample area (In Chinese). *Tropical Agricultural Sciences*, 2003, 23(3): 14—17
- [25] 如皋县土壤普查办公室, 江苏省土壤普查办公室. 江苏省如皋县土壤志. 1987. Soil Survey Office of Rugao County, Soil Survey Office of Jiangsu Province. Soils in Rugao County, Jiangsu Province (In Chinese). 1987
- [26] 邹忠, 杨荣清, 丁峰, 等. 江苏省如皋市长寿现象与土壤环境关系研究初探. *土壤*, 2005, 37(1): 89—94. Zou Z, Yang R Q, Ding F, et al. Relationship between longevity and environment in Rugao County of Jiangsu Province (In Chinese). *Soils*, 2005, 37(1): 89—94
- [27] 杨荣清, 黄标, 孙维侠, 等. 江苏省如皋市长寿人口分布区土壤及其微量元素特征. *土壤学报*, 2005, 42(5): 753—760. Yang R Q, Huang B, Sun W X, et al. Soils and trace elements in the distribution area of longevous people in Rugao County of Jiangsu Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 753—760
- [28] 朱静, 黄标, 孙维侠, 等. 农田土壤有效态微量元素的时空变化及其影响因素研究. *南京大学学报: 自然科学版*, 2007, 43(1): 1—12. Zhu J, Huang B, Sun W X, et al. Temporal-spatial variability and its influencing factors of available trace metals in soils (In Chinese). *Journal of Nanjing University: Natural Science Edition*, 2007, 43(1): 1—12
- [29] 廖菁菁, 黄标, 孙维侠, 等. 农田土壤有效磷的时空变异及其影响因素分析——以江苏省如皋市为例. *土壤学报*, 2007, 44(4): 620—628. Liao J J, Huang B, Sun W X, et al. Spatio-temporal variation of soil available phosphorus and its influencing factors—A case study of Rugao County, Jiangsu Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(4): 620—628
- [30] 孙维侠, 赵永存, 黄标, 等. 长江三角洲典型地区土壤环境中 Se 的空间变异特征及其与人类健康的关系. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(1): 113—118. Sun W X, Zhao Y C, Huang B, et al. Spatial variability of selenium in soil environment and its correlation with human health in the Yangtze River delta of China (In Chinese). *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(1): 113—118
- [31] 龚子同, 等. 中国土壤系统分类——理论·方法·实践. 北京: 科学出版社, 1999. Gong Z T, et al. Chinese soil taxonomy—Theory, methodology and practices (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999
- [32] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [33] 蔡永明, 张科利, 李双才. 不同粒径制间土壤质地资料的转换问题研究. *土壤学报*, 2003, 40(4): 511—517. Cai Y M, Zhang K L, Li S C. Study on the conversion of different soils texture (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 511—517
- [34] USDA. NRCS. Keys to soil taxonomy. 11th ed. 2010
- [35] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 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. 第 3 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001. Chinese Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. Keys to Chinese Soil Taxonomy (In Chinese). 3rd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001
- [36] 龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 土壤发生与系统分类. 北京: 科学出版社, 2007: 387—394. Gong Z T, Zhang G L, Chen Z C, et al. Soil genesis and taxonomy (In Chinese). Beijing: Science Press, 2007: 387—394
- [37] 曹志洪, 周健民, 等. 中国土壤质量. 北京: 科学出版社, 2008: 77—78. Cao Z H, Zhou J M, et al. Soil quality of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 2008: 77—78
- [38] 江苏省土壤普查办公室. 江苏土壤. 北京: 中国农业出版社, 1995. Soil Survey Office of Jiangsu Province. Jiangsu soil (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1995
- [39] 于君宝, 王金达, 刘景双, 等. 典型黑土 pH 值变化对微量元素有效态含量的影响研究. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 93—95. Yu J B, Wang J D, Liu J S, et al. Effect of soil pH value variation on effective content of trace elements in typical black soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(2): 93—95
- [40] 中国科学院南京土壤研究所微量元素组. 土壤和植物中微量元素分析方法. 北京: 科学出版社, 1979: 253—254. Trace Element Group of Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Analysis method of trace elements in soils and plants (In Chinese). Beijing: Science Press, 1979: 253—254
- [41] 马瑾, 周永章, 万洪富. 广东韩江三角洲南部农业土壤氟含量状况及分析. *土壤通报*, 2008, 39(2): 375—378. Ma J, Zhou Y Z, Wan H F. Investigation on fluorine content in soil of south Hanjiang delta, Guangdong Province (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(2): 375—378
- [42] 侯少范, 李德珠, 王丽珍. 我国土壤中结合态硒的含量和分布规律. *地理研究*, 1990, 9(4): 17—25. Hou S F, Li D Z, Wang L Z. China's soil-bound selenium content and distribution (In Chinese). *Geographical Research*, 1990, 9(4): 17—25
- [43] 李静, 谢正苗, 徐建明. 我国氟的土壤环境质量指标与人体健康关系的研究概况. *土壤通报*, 2006, 37(1): 194—199. Li J, Xie Z M, Xu J M. Research progress in the relationship between soil environmental quality index of fluorine and human health in China (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1): 194—199
- [44] Huang B, Zhao Y C, Sun W X, et al. Relationships between distributions of longevous population and trace elements in the agriculture ecosystem of Rugao County, Jiangsu, China. *Environ Geochem Health*, 2009, 31: 379—390
- [45] 邢光熹, 朱建国. 土壤微量元素和稀土元素化学. 北京: 科学出版社, 2003: 3—24. Xing G X, Zhu J G. Chemistry of trace and rare earth elements in soils (In Chinese). Beijing: Science Press, 2003: 3—24

## SOIL SERIES OF RUGAO COUNTY, JIANGSU AND THEIR PRODUCTIVITY AND ECO-ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

Wang Hong<sup>1,2</sup> Huang Biao<sup>1†</sup> Sun Weixia<sup>1</sup> Hu Wenyong<sup>1</sup> Zhao Yongcun<sup>1</sup> Gong Zitong<sup>1</sup>

(1 *Soil Environment and Pollution Remediation Laboratory, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract** Soil series is the basement of the soil taxonomy and also a bridge connected with their productivity and eco-environmental evaluation, Therefore, they are of great theoretical and practical significance to soil classification and its application. On the basis of the data collected during of the second national soil survey and ongoing researches, through field observation and soil investigation of and analyses for soil physical and chemical properties and trace elements in Rugao County, Jiangsu Province, soils of the county were classified by series and their productivity and eco-environmental features studied. In line with principles, basis and diagnostic soil horizons for soil classification set in the study, the soils of the county were sorted into 9 soil series. The differences between the series in basic soil physical and chemical properties and trace elements validated reliability of the classification methods. The differences between various series were significant differences in particle size compositions, chemical properties, nutrient properties, and trace elements reflecting that each soil series has its own unique productivity and eco-environmental characteristics.

**Key words** Soil series; Basic categories of soil classification; Rugao; Soil productivity; Eco-environmental characteristics