

# 长江下游平原区乡村景观的结构、管理和土壤有机碳研究

武俊喜<sup>1</sup>, 焦加国<sup>2,3</sup>, 肖红生<sup>4</sup>, 王洪庆<sup>5,6</sup>, 程序<sup>1,\*</sup>, 杨林章<sup>3</sup>, Ellis Erle C.<sup>5</sup>

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院农学系, 北京 100094; 2. 南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095;

3. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 4. 华南农业大学热带与亚热带生态研究所, 广东 510642;

5. Department of Geography and Environmental Systems, University of Maryland, Baltimore County, Maryland, USA, 21250;

6. Environmental Sciences Institute, Florida A&M University, Tallahassee, Florida, USA)

**摘要:**通过实地研究主要位于宜兴市域的区域乡村景观代表性样方,评价并阐明了人口密集的长江下游平原区乡村景观的结构,土地管理与土壤有机碳储量的关系。景观绘图是基于 1m 分辨率的 IKONOS 影像并采用生态立地分类及绘图标准,通过直接解译和实地检验对边界清晰的均质景观缀块进行分类和绘图;依据区域权重分层取样设计方法,在生态立地斑块中随机设定取样点进行土壤和淤泥取样;利用区域权重系数进行区域土地利用/覆被和土壤有机碳储量评价计算。结果表明:在  $2.13 \times 10^6 \text{ hm}^2$  的长江下游平原区乡村景观面积范围内,0~30cm 土壤有机碳储量为 76.97Tg。该区域土地利用/覆被的主要类型为水田,水产养殖,非渗漏性建筑用地,旱地 1 年生作物和水浇地多年生作物,这 5 种类型的面积百分数和土壤有机碳储量百分数分别为 83%和 85%。其中平原稻田面积为  $0.89 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占总面积的 42%;其 0~30cm 土壤有机碳储量高达 36.60Tg,占总储量的 48%。通过区域分层取样和小尺度景观斑块的区域权重推绎分析,揭示了人口密集的乡村景观中土地利用/覆被方式对当地和区域土壤有机碳的影响模式。这种在小尺度下对土地管理调查,土壤有机碳和其它生态特征研究的方法明显优于传统的基于 30~1000m 分辨率遥感影像的土地覆被研究和基于土壤类型的区域土壤有机碳储量评价方法。

**关键词:**长江下游平原区;乡村景观;生态立地;土壤有机碳密度;土壤有机碳储量

文章编号:1000-0933(2006)12-4135-13 中图分类号:Q143 文献标识码:A

## Landscape structure, management and soil organic carbon in the densely populated village landscapes of China's Yangtze Delta Plain

WU Jur-Xi<sup>1</sup>, JIAO Jia-Guo<sup>2,3</sup>, XIAO Hong-Sheng<sup>4</sup>, WANG Hong-Qing<sup>5,6</sup>, CHENG Xu<sup>1,\*</sup>, YANG Lin-Zhang<sup>3</sup>, ELLIS Erle C.<sup>5</sup>

(1. Department of Agronomy & Agroecology, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 2. Department of Resources & Environmental Sciences, Nanjing Agriculture University, Nanjing, Jiangsu 210095, China; 3. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China; 4. Institute of Tropical & Subtropical Ecology, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 5. Department of Geography and Environmental Systems, University of Maryland, Baltimore County, Baltimore, Maryland 21250, USA; 6. Environmental Sciences Institute, Florida A&M University, Tallahassee, Florida, USA). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4135~4147.

**Abstract:** We examined interactions between landscape structure, land management and soil organic carbon (SOC; top 30 cm)

**基金项目:**美国国家科学基金资助项目(Grant DEB-0075617)

**收稿日期:**2006-04-03;**修订日期:**2006-11-17

**作者简介:**武俊喜(1975~),男,内蒙古人,博士生,主要从事乡村景观生态学研究。E-mail: wujxau@sohu.com

\*通讯作者 Corresponding author. E-mail: chengxu@cau.edu.cn

**致谢:**本研究以美国国家科学基金项目(Grant:DEB-0075617)研究为基础;该项目由美国马里兰大学 Ellis Erle C. 博士主持,与中国科学院南京土壤研究所杨林章研究员,中国科学院地理所欧阳华研究员,中国农业大学农学与生物技术学院程序教授合作;项目实施得到江苏省宜兴市农业局土壤肥料工作站,宜兴市徐舍镇农业服务中心的大力支持,感谢沈睿,黄洪光,吴顺培,廖海丰等协助工作,特此致谢。

**Foundation item:** The US National Science Foundation under Grant DEB-0075617 awarded to Ellis Erle C. in 2000

**Received date:** 2006-04-03; **Accepted date:** 2006-11-17

**Biography:** WU Jur-Xi, Ph. D. candidate, mainly engaged in village landscape ecology. E-mail: wujxau@sohu.com

within the densely populated village landscapes of the Yangtze Delta Plain based on an intensive field study in Yixing Municipal, a regionally-representative sample of the Yangtze Delta Plain. We mapped landscapes at a high spatial resolution and classified them into ecologically-distinct features (ecotopes) by the direct interpretation and field validation of features in 2002 IKONOS imagery using a standardized mapping procedure. We then collected samples of soils and sediments for analysis at random points within ecotope features selected by a regionally-weighted stratified sampling design. The five most extensive land use / land cover categories in the Yangtze Delta Plain were paddy, built structures with impervious cover, aquaculture, rainfed annual and irrigated perennial croplands, which occupied 83 % of the total area and contained 85 % of the total SOC stored in the region's village landscapes. Regional scaling analysis indicates that  $2.13 \times 10^6 \text{ hm}^2$  of Yangtze Delta Plain village landscapes (estimated from Landsat imagery) sequestered 76.97 Tg of SOC, of which 48 % was in paddy land (37 Tg), covering 42 % of the region's total surface area ( $0.89 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ). By combining a regionally-stratified sample of fine-scale landscape features with a regionally-weighted upscaling analysis, the role of land use / land cover in determining local SOC patterns and the regional consequences of these patterns were revealed across a densely populated agricultural region of China. This fine scale approach to investigating land management practices and their impacts on soil carbon and other ecosystem properties offers significant advantages over conventional lower-resolution methods for land cover and SOC assessments based on the regional soil types.

**Key words:** Yangtze Delta Plain; village landscape; ecotope; soil organic carbon density; soil organic carbon storage

碳循环研究是全球变化研究中最主要的科学问题之一。在温室气体源和汇研究中,土地利用/覆被变化引发的土壤碳循环的不确定性最大。这种不确定性的来源很多<sup>[1,2]</sup>,其中重要因素之一是对人为景观,尤其是人口密集的乡村景观长期变化的规模、驱动力和生态过程缺乏足够的了解。本研究所指的人口密集的乡村景观<sup>[3]</sup>,是指人口密度为 100 ~ 2500 人/ $\text{km}^2$ ,且农村覆盖面积大于 25 %和城镇覆盖面积小于 25 %的地区<sup>[4]</sup>。这些区域区别于低密度人口的农业景观或农业生态系统诸如牧场,大规模的农场,临时性的农田等。

全球人口密集的乡村景观面积巨大,约 67 %分布于亚洲,26 %分布于中国。中国约有 5.2 亿人口管理着  $2.31 \times 10^6 \text{ km}^2$  的乡村景观<sup>[3,4]</sup>,而长江中下游平原属于典型的人口密集的乡村景观分布区域之一<sup>[4,5]</sup>。

传统的土地利用覆被变化研究通常是基于 30 ~ 1000m 分辨率的遥感数据<sup>[6-12]</sup>。但是人口密集的乡村景观包括了大量小面积 (< 30m 分辨率)集约化管理的土地利用/覆被类型,对于这些景观均质单元及其土壤有机碳的分布和变化研究,传统的研究方法是无能为力的<sup>[3,4]</sup>。

目前,全国及区域范围的土壤有机碳研究多数采用全国第一次和第二次土壤普查资料,利用土壤类型法统计分析<sup>[13-25]</sup>,该方法主要考虑土壤类型和分布面积对有机碳密度和储量分布的影响;而对土地管理、利用和覆被对土壤有机碳的影响作用考虑相对较少,而第二次土壤普查已距今有十几年,土壤有机碳密度也发生了变化<sup>[26-29]</sup>,县域尺度的研究往往会采用近年来测定数据<sup>[30-32]</sup>。

为了减少区域乡村景观中土壤有机碳评价的不确定性,本研究利用 1m 分辨率的 IKONOS 遥感影像和人为景观生态立地分类和绘图标准,研究小尺度的乡村景观结构,土地利用/覆被及其对土壤有机碳的影响;并对长江下游平原区乡村景观土地利用及其土壤有机碳储量进行评价。乡村景观的结构,土地管理均在小尺度 (< 30m)上具有高度的异质性,研究这种高度异质性对景观的空间特征和生态学过程的影响,有助于更准确的评价区域尺度的乡村景观特征。

## 1 研究区域及景观样方选取

本研究中的长江中下游平原区是 Verburg 基于地形、气候和土壤肥力等变量利用 K 均值聚类得到的生态区域<sup>[4,5]</sup>,是人口密集的乡村景观分布的典型区域之一。本研究是针对该区域内成像的 Landsat 7 ETM+ 7 波段彩色影像(成像时间 2001 年 7 月 26 日,分辨率为 28.5m,投影为 UTM51N)覆盖区域中乡村景观的土地利用/覆被面积及其 0 ~ 30cm 土壤有机碳进行评价。该影像覆盖于长江下游平原区内,主要有江苏省中南部,少部分浙江省北部和安徽省东部(图 1)。

因研究区域位于长江中下游平原区<sup>[4,5]</sup>,所以其地形,气候和土壤肥力等在整个区域中具有相似性。为了

通过景观样方的精细研究能较准确推绎研究区域的土地利用/覆被类型及其面积,本研究采用了 Landsat 影像土地覆被粗分类结果和距城镇直线距离等变量来进行聚类分析,并在研究区域内成像的 IKONOS 影像覆被区选取 12 个 500m ×500m 的景观样方<sup>[4]</sup>。具体取样过程见图 1。

采用 ERDAS 软件中监督分类模块将 Landsat 影像的土地覆被分为 5 类<sup>[4]</sup>(表 1),分类准确率为 84%,总的 Kappa 值为 0.81。基于该分类图并对完全覆盖其的网格(500 m ×500 m)进行土地覆被和距城镇直线距离的区域统计(Arcgis8.3),然后直接剔除覆盖河中岛屿及沿海区的网格,并结合数字高程选取完全位于海拔 < 50m 的区域的网格;最后进一步剔除土地覆被面积比例总计小于 97.5%,或水域覆被面积大于 75%,或城镇建筑覆被大于 25%的网格。在余下的网格中,以 5 个土地覆被类型的面积比例和距城镇直线距离作为指标变量并标准化处理,进行两步聚类(Two Step cluster)和 K 均值聚类(K-mean cluster)<sup>[4]</sup>。首先进行两步聚类产生了 2 个类别,据结果分析剔除了沿海地区的国营农场区;剩余网格再进行两步聚类得到 2 个类别,分别是类别 1(82127 个网格):离城镇近,类别 2(2972 个网格):离城镇远。然后对 85099 个网格分别设定 2,3,4,5,6,7,10 和 15 个类别进行 K 均值聚类;最后选取 3 个聚类类别的数据作为选取研究样方的依据,选取研究样方是限定在 100km<sup>2</sup> 的校正后的 IKONOS 影像覆被矩形区域内<sup>[33]</sup>,选取聚类类别 1(32780 个网格,稻田为主)的单元格 5 个;聚类类别 2(32709 个网格,其它农作物为主,离城镇远)的单元格 4 个;聚类类别 3(19610 个网格,水域和村庄为主,离城镇近)的单元格 3 个作为研究样方。共计选取乡村景观样方 12 个<sup>[4]</sup>;其中 9 个位于宜兴市域,另有 3 个样方紧邻宜兴市域但属于溧阳市辖区。

根据 Landsat 影像土地覆被粗分类结果计算,从长江下游平原区到乡村景观样方,不同尺度的乡村景观中同一土地覆被类型面积比例相似性较大,而校正样方与长江下游平原区则更为相似(表 1),较高的相似度是尺度推绎的基础和必要条件。

表 1 长江下游平原区,宜兴市域,研究区,景观样方和校正景观样方中土地覆被的特征比较

Table 1 Comparison of land use/land cover among sampled cells, site, Yixing Municipal and Yangtze Delta Plain

土地覆被 Land cover	长江下游平 原区 Region	宜兴市域 Yixing Municipal	宜兴研究区 Site	景观样方 Sample	校正样方 <sup>*</sup> Correct sample
乡村建筑 Village builtup (%)	15	14	11	17	17
城镇建筑 Urban builtup (%)	1	1	0	0	0
稻田 Paddy (%)	33	38	53	45	35
其他农作物 Other agriculture crop (%)	44	34	21	30	39
水域 Water (%)	8	13	14	8	8
乡村景观面积 Area of village landscape (hm <sup>2</sup> )	2127475	114738	8700	300	25

\* 校正景观样方中的土地覆被比例是依据区域权重公式计算 Percent land cover was estimated from the 28.5m classified land cover dataset and from the sample cells corrected using the regional weighted

尺度推绎是依据 Ellis 提出的区域聚类距离倒数平方权重(简称:区域权重 CDW)及区域评价公式计算<sup>[4]</sup>:

$$CDW_i = \left[ \frac{1}{CD_i^2} / \left( \frac{n_k}{i} \frac{1}{CD_i^2} \right) \right] \times \frac{N_k}{N_i} \quad (1)$$

(1)  $CDW_i$  为取样样方  $i$  的区域聚类距离倒数平方权重;  $CD_i$  为取样样方  $i$  在  $k$  类别中的聚类距离;  $n_k$  为  $k$  类别中取样样方数目;  $N_k$  为  $k$  类别中单元格总数;  $N_i$  为区域中聚类单元格总数。

$$CDW_{ECO_j} = \left[ \sum_i^I ECO_{ij} \times CDW_i \right] / \sum_i^I A_i \quad (2)$$

(2)  $CDW_{ECO_j}$  为生态立地类型(Ecotope)  $j$  的区域权重;  $I$  为取样样方总数;  $ECO_{ij}$  为取样样方  $i$  中生态立地类型(Ecotope)  $j$  的面积;  $CDW_i$  为取样样方  $i$  的区域权重,  $A_i$  为取样样方  $i$  的面积。

$$R_{ECO_j} = CDW_{ECO_j} \times A_r \quad (3)$$

(3)  $R_{ECO_j}$  为区域中生态立地类型(Ecotope)  $j$  的面积,  $A_r$  为区域面积。

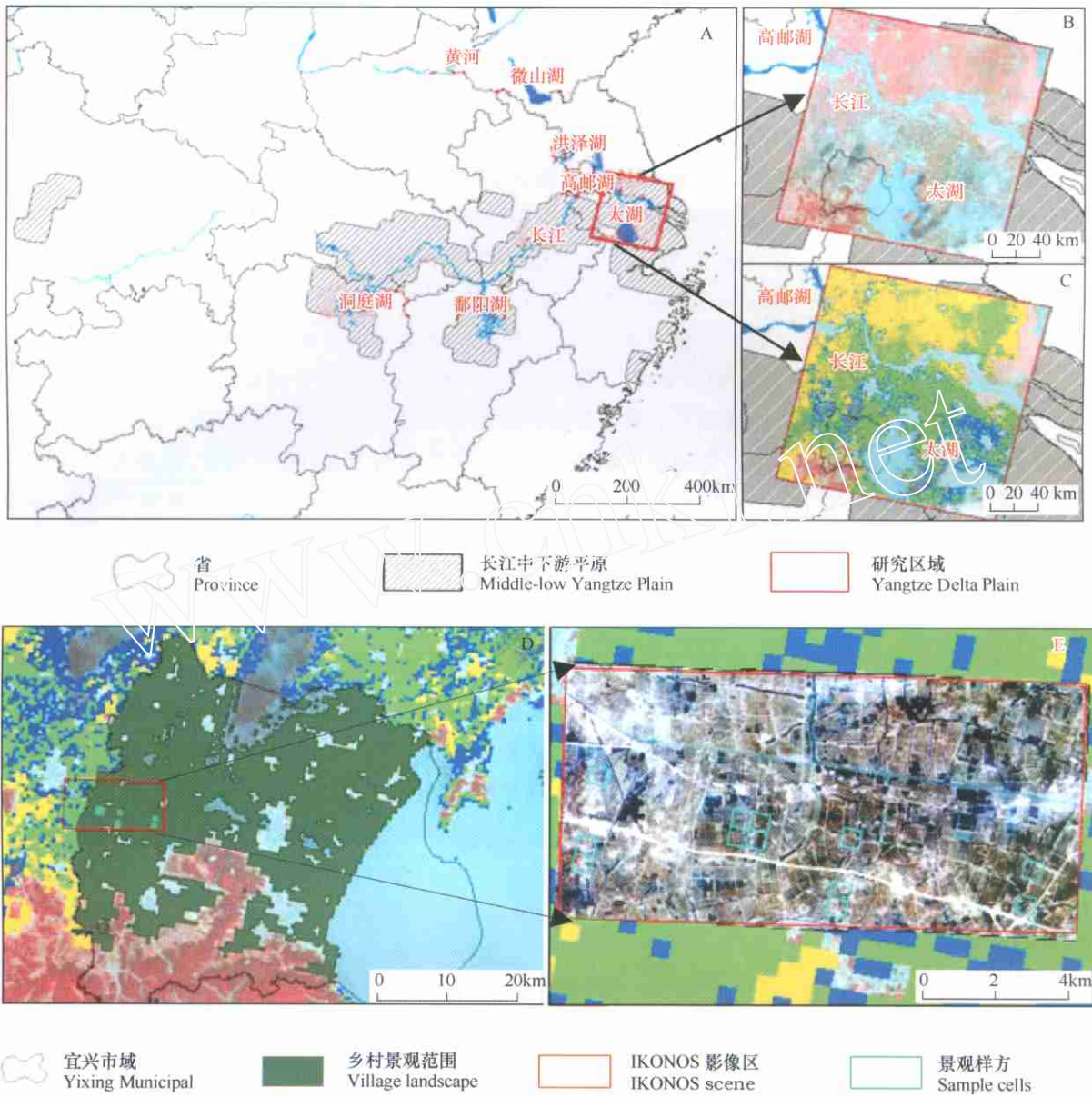


图1 长江下游平原区人口密集的乡村景观取样过程

Fig 1 Sample selection of the densely populated village landscapes of the Yangtze Delta Plain

A: 长江中下游平原及长江下游平原区研究区域(Landsat 影像覆盖范围) Middle-low Yangtze Plain and Studied region covered by Landsat imagery boundary on Yangtze Delta Plain; B: Landsat 影像 Landsat imagery; C: 500 m × 500 m 聚类单元格覆盖 Region covered by 500 m × 500 m cluster cells; D: 宜兴市域、市域乡村景观范围和和研究样区(IKONOS 覆盖) Yixing Municipal, village landscape of Yixing Municipal and site covered by orthorectified IKONOS imagery<sup>[33]</sup>; E: 研究样区和景观样方 Site covered by orthorectified IKONOS imagery and sample cells.

注: 图A 中省界、河流和湖泊数据下载至国家基础地理信息系统([http://nfgis.nsd.gov.cn/nfgis/chinese/c\\_xz.htm](http://nfgis.nsd.gov.cn/nfgis/chinese/c_xz.htm))

Note: The boundaries of the provinces, the rivers and lakes were downloaded from the web of national fundamental geographic information system ([http://nfgis.nsd.gov.cn/nfgis/chinese/c\\_xz.htm](http://nfgis.nsd.gov.cn/nfgis/chinese/c_xz.htm))

## 2 乡村景观的分层分类系统

为了考察细微尺度的乡村景观结构,尽量使景观缀块分类有利于体现更多的信息量,采用了人为生态立地分类和绘图标准(Anthropogenic Ecotope Mapping & Classification (AEM)<sup>[34]</sup>。该分类体系包括 4 个生态分类层次:地形(Land form) 土地利用(Land use) 土地覆被(Land cover) 细分组(Group) + 类型(Type)。表 2 中描述了仅在本研究中所用到的部分分类代码及其含义,因土地利用/覆被细分组中的类型(Type)非常多,未在表中列出。由 4 级分类代码组合成生态立地分类代码,表示至少连续两年稳定且管理方式明显不同的最小的景观均质单元(ecotope)<sup>[3,4,34~37]</sup>。例如生态立地:FPPAr01 表示平原水稻田,地形代码:FP (Floodplain) 即平原,土地利用代码:P (Paddy) 即稻田,土地覆被代码:A (Annual) 即一年生作物,利用/覆被细分组:ri (Hydromorphic crops) 和类型(01) 组合表示水稻。

该系统不仅可以对人口密集的乡村景观中细微尺度的所有土地利用/覆被类型进行分类,而且可以单独或合理组合分类代码,提取由简单到复杂的土地利用、覆被和管理信息。景观制图是基于 1m 分辨率的 IKONOS 彩色影像,利用 GPS 实地调查核实后,利用地理信息系统 Arcgis8.3 在 12 个景观样方中以生态立地为单元进行数字化制图<sup>[4,34,36,37]</sup>。绘图的基本标准是:线性地物宽度 2m;面状地物且边界清晰的、其宽度 5m 或面积 25m<sup>2</sup>;面状地物且边界模糊的、其宽度 10m 或面积 100m<sup>2</sup>,依据生态立地(Ecotope)的分类标准进行绘制<sup>[4,34,36]</sup>。

表 2 乡村景观 4 级分类描述

Table 2 Ecotope classification levels and classes for village landscapes

地形 Land form		土地利用 Land use		土地覆盖 Land cover		利用/覆被细分组 Group	
代码 Code	描述 Description	代码 Code	描述 Description	代码 Code	描述 Description	代码 Code	描述 Description
AN	人工地段 Anthropogenic	A	水产养殖 Aquaculture	A	一年生植被 Annual	ac	一年生作物 Annual crops
FP	冲积平原 Floodplain	C	建设用地 Constructed	E	裸露地面 Bare soil	aq	水产养殖 Aquaculture
CA	宽 < 30m 运河 Small canal	D	人为干扰地类 Disturbed	M	混合覆被 Mixed	db	干扰地类覆被 Disturbed & Debris
CB	宽 > 30m 运河 Large canal	F	闲置地类或水域 Fallow	P	多年生植被 Perennial	dw	落叶灌木作物 Deciduous woody crops
PA	宽 < 30m 池塘 Small pond	I	水浇地 Irrigated	S	硬化地面 Sealed	dt	落叶阔叶树 Deciduous broadleaf trees
PB	宽 > 30m 池塘 Large pond	L	禽畜舍 Livestock	W	水面 Water	ho	房屋 Housing
FM	深 < 1m 活水沼泽 Flowing Marsh	M	开采或填埋地 Mine & Fill			hv	水生植被 Hydromorphic vegetation
MA	深 < 1m 静水沼泽地 Marsh	O	观赏园艺 Ornamental			ir	灌溉渠或储水池 Irrigation
CM	深 < 1m 且宽 > 10m 运河边缘 Margins of canal	P	水田 Rice paddy or other flooded crops			nb	非工业建筑 Non-industrial
WM	深 < 1m 且宽 > 10m 水体边缘 Margins of Lentic waterbody	R	旱地 Rainfed			os	独立的密封或坚实地面 Other sealed
		T	人工林或草 Forestry			pp	公共种植 Public plantings
						ri	水生作物 Hydromorphic crops
						tg	高草 Tall graminoids
						tr	道路和桥梁 Transportation
						wa	水面 Water surface

## 3 乡村景观中土壤取样及分析

### 3.1 土壤取样设计

土壤取样是基于 2002 年和 1940's 以生态立地为单元的景观分类图<sup>[4]</sup>,以及景观分类的区域权重(公式 1~2)来设计。

由于小面积缀块较多,为了避免造成产生较大的抽样偏差,未采用基于缀块的随机取样方法,而是采用美国马里兰大学 Ellis 提出的景观组合取样与缀块的随机取样相结合的方法:首先限定 3km<sup>2</sup> 景观样方(12 Cells)所需土壤取样数目为 150 个(最初取样时设定值,最终数目有少许调整),然后依据缀块的 3 种景观分类组合:

生态立地 (Ecotope), 地形与土地利用/覆被组合 (FUC = Form + Use + Cover) 以及土地利用和覆被组合 (UC = Use + Cover) 的区域权重 (公式 1~2), 确定并调整在不同景观分类组合的土壤取样数量。

取样数目  $N = 150 \times CDW$  (Ecotope or FUC or UC); 按照生态立地 地形和土地利用/覆被 土地利用/覆被景观分类组合先后顺序计算取样数目并进行取样, 如果前面的取样结果包含后面的景观分类组合, 则不再重复取样。每种景观分类组合最小取样量为 3 个, 而最大取样量在基于 2002 年和 1940's 景观类型取样时各不相同, 分别不超过 10 个和 5 个。上述取样结束后, 从剩余未被取样的景观分类组合中, 若其生态立地和土地利用/覆被的区域权重大于 0.5%, 对每种景观分类组合选取 3 个样。另外, 在上述规则基础上, 考虑长期的乡村景观变化历史, 增选了一些确切无疑发生转变的景观类型进行土壤取样。最后, 如果土壤取样数目不够, 按上述规则将其增加至 150 个左右。应当说明的是, 此取样方法保证各种景观类型取样的完整性, 以便研究各景观类型生态特征的空间异质性, 因此, 样本的比例不一定与样本所代表的面积比例一致。

在确定不同景观分类组合下的土壤取样数目后, 在 12 个样方中所有符合土壤取样的生态立地缀块中随机取样, 然后在选取的缀块上随机抽取土壤取样点, 一般是 1 个生态立地缀块上取 1 个土样, 少数面积较大, 数量极少的缀块上多于 1 个土样。

### 3.2 田间采样

将随机取样点输入 GPS, 根据 GPS 导航定位和样点所属景观类型准确找到样点位置。然后去除样点表面的杂草、石头等杂物, 用直径 5.08cm 的分裂式采样器进行采样, 采样深度为 30cm, 分为两层, 分别为 0~15cm 和 15~30cm, 然后分别装入定制的布袋中, 采回的土样及时称鲜重后风干。淤泥取样同样是在距离采样点 10m 范围内, 用淤泥采样器采集 30cm 深度的淤泥样品, 后期处理同土壤样品。

### 3.3 样品处理及实验室分析

土壤样品风干后称重, 然后剔除植物根系、石子和昆虫等杂物后, 全部研磨并过 2mm 筛, 过筛后再次称量风干土重。然后从中取约 80g 土样, 全部研磨并过 0.25mm 筛, 用于土壤养分测定分析。

容重测量公式: 土壤容重 = 过 2mm 筛的全部土壤风干重 / 土钻中土壤体积; 淤泥容重 = 过 2mm 筛的全部淤泥风干重 / 取样器中淤泥体积。

土壤有机碳测定采用外加热 - 重铬酸钾容量法, 用标样 7416 及重复来确保测定的准确性。

### 3.4 评价土壤有机碳密度和储量

$$SOC_{dj} = 10 \times \sum_{i=1}^n C_{ij} AWD_{ij} \times 0.15 \quad (4)$$

式中,  $SOC_{dj}$  为生态立地类型  $j$  的 0~30cm 土层土壤有机碳密度 ( $t/hm^2$ );  $n$  指  $n$  个土壤取样层;  $C_{ij}$  为生态立地类型  $j$  的第  $i$  取样土层的有机碳含量 ( $g/kg$ );  $AWD_{ij}$  为生态立地类型  $j$  的第  $i$  取样土层中去除  $>2mm$  砾石后的单位体积的土壤风干重量 ( $g/cm^3$ ); 0.15 为第  $i$  取样土层深度 (m) (注: 淤泥取样深度均为 0.3m)。

$$SOC_j = SOC_{dj} \times R_{ECO_j} \quad (5)$$

式中,  $SOC_j$  为区域中生态立地类型  $j$  的 0~30cm 土层土壤有机碳储量;  $SOC_{dj}$  为生态立地类型  $j$  的 0~30cm 土层土壤有机碳密度;  $R_{ECO_j}$  为区域中生态立地类型  $j$  的面积。

$$SOC_i = \sum_j^N SOC_{dj} \times R_{ECO_j} \quad (6)$$

式中,  $SOC_i$  为区域中 0~30cm 土层土壤有机碳储量,  $N$  为生态立地类型数目。

## 4 结果与分析

### 4.1 生态立地的异质性及其土壤有机碳密度的空间变异

景观样方中生态立地类型 (Ecotope) 有 110 个, 涵盖地形类型 (Form) 10 个, 土地利用类型 (Use) 11 个, 覆被类型 (Cover) 6 个, 土地利用/覆被组合类型 (UC) 有 25 个, 地形和土地利用/覆被组合 (FUC) 有 49 个, 土地利用/覆被细分组 (Group) 有 25 个, 细分组中的类型 (Group + Type) 共计有 73 个。不同的分类类型及其组合代表了

不同的土地利用、覆被和管理信息。

景观样方中有效的土壤样点总数计为 148 个,其中包括 51 个淤泥样品(表 3 和表 4)。共涵盖生态立地类型(Ecotope)26 个,占该类型总数的 23.6%;土地利用/覆被组合类型(UC)15 个,占该类型总数的 60.0%;地形和土地利用/覆被组合类型(FUC)21 个,占该类型总数的 42.9%。从取样类型比例看,说明乡村景观中的土地面积集中在相对较少的类型中,大部分生态立地类型所占的土地面积较小,其中 24 个生态立地类型占总样方面积的 90%左右,其余 86 个所占面积比例仅 10%左右,说明了长江下游平原区的乡村景观具有较高的异质性和同质景观单元的高度分散性。

乡村景观中陆地上的生态立地类型 0~15cm 和 15~30cm 土层土壤有机碳密度均值分别为 19.66 t/hm<sup>2</sup> 和 14.50 t/hm<sup>2</sup>(表 3)。生态立地类型土壤有机碳密度在 0~15cm 土层有显著差异,而在 15~30cm 土层则没有显著差异,而前者只有公共建筑(ANCSnb06)和呈线性种植的观赏灌木和树(ANOMpp05)与其它类型间的有显著差异,这两种生态立地类型的土壤层次形成过程受到过较大的人为扰动。除这两种生态立地类型外,其余生态立地类型间的土壤有机碳密度均没有显著差异。

比较 0~15cm 和 15~30cm 土层,土壤有机碳密度呈显著或极显著差异的生态立地类型,除了成片楼房群外,其余是不同的耕地类型,均是上层土壤有机碳密度高于下层。而水泥或沙石道路(ANCSr02)和呈线性种植的观赏灌木和树(ANOMpp05)的下层土壤有机碳均值则略高于上层,但并无显著差异;主要是由于这 2 种生态立地类型的样点均位于道路侧旁或其上,而其土壤层次在生态立地形成过程中均受到较大的扰动。总的来看,耕地类型中土壤有机碳密度较高,人工地段的类型(Form=AN)土壤有机碳密度总体上偏低。

表 3 0~15 和 15~30cm 土层有机碳密度

Table 3 SOC density of ecotope classes in 0~15cm layers and 15~30cm layers, respectively

生态立地 Ecotope code and description	样本数 Sample number	均值 (0~15cm) <sup>S</sup> Mean (t/hm <sup>2</sup> )	均值 (15~30cm) <sup>S</sup> Mean (t/hm <sup>2</sup> )
FPIPdw39 水浇地成熟桑园 Irrigated small-scale mature mulberry	9	25.61 a **	15.82 a
FPRPdw39 旱地成熟桑园 Rainfed small-scale mature mulberry	8	25.85 a **	14.37 a
FPPAri01 平原稻田 Rice paddy	10	24.15 ab *	16.95 a
FPIAac01 水浇地蔬菜 Irrigated small-scale intensive crops	6	23.17 ab **	14.52 a
ANDAdb06 以草覆被为主的人为干扰区 Disturbed herbaceous vegetation with debris	3	22.39 ab	14.73 a
FPRAc04 1 年生旱地作物 Rainfed small-scale staple crops	10	20.89 abc **	14.83 a
FPRAc01 旱地蔬菜 Rainfed small-scale intensive crops	4	20.76 abc	15.29 a
FPPMdb07 以灌草为主的人为干扰区 Disturbed woody with debris	3	20.70 abc	15.47 a
FPIAac04 水浇地 1 年生作物 Irrigated small-scale staple crops	3	20.64 abc	15.32 a
ANCSHo04 成片的楼房群 Attached >1 story house	16	20.62 abc **	14.27 a
FPPDpb08 以树灌为主的人为干扰区 Disturbed trees with debris	3	20.33 abc	15.01 a
ANRAac04 1 年生旱作物 Rainfed small-scale staple crops	7	19.51 abc	15.03 a
ANCEir01 灌排土渠 Irrigation & drainage ditch with bare soil	3	16.78 abc	12.70 a
ANTAtg01 人工地段种植的高草 Planted tall graminoid	3	15.45 abc	12.83 a
ANCSr02 水泥或沙石道路 Paved road	3	14.34 abc	19.63 a
ANCSnb06 公共建筑 Large public buildings	3	13.17 bc	9.00 a
ANOMpp05 呈线性种植的观赏灌木和树 Public planting woody with linear	3	9.81 c	10.74 a
汇总 Total	97	19.66	14.50

S:不同的字母表示 SNK 统计检验 ( $p < 0.05$ ) 差异显著 Means of ecotope classes with different letters are statistically significantly different ( $p < 0.05$ ) as tested using Student-Newman-Keuls(SNK) from GLM( $p < 0.001$ ); \* 或 \*\* :表示 0~15cm 和 15~30cm 土层土壤有机碳 T 检验差异显著 ( $p < 0.05$ ) 和极显著 ( $p < 0.01$ ) Mean of ecotope classes with asterisk and double asterisks are statistically significantly different ( $p < 0.05$  or  $p < 0.01$ ) as tested using independent-sample T test between 0~15cm and 15~30cm layers, respectively

乡村景观中水域和水陆交界带的生态立地类型 0~30cm 深淤泥的有机碳密度均值为 26.28t/hm<sup>2</sup>(表 4),其中静水沼泽中水草区(MAFAhv01)的中淤泥的有机碳的密度显著的高于其它生态立地类型。

由此说明,人口密集的长江下游平原区乡村景观中,虽然生态立地类型多样且呈现高度的异质性,但是乡

村景观的大部分面积集中于少数的生态立地类型中;土壤有机碳密度的显著性差异仅集中在少数的生态立地类型之间;多种生态立地类型的不同土壤层次间有机碳密度存在显著差异。由此说明,土壤有机碳密度不仅受到土地利用、覆被和管理历史的影响,而且,同一土地利用/覆被类型下土壤类型的差异也是土壤有机碳密度空间变异的来源之一<sup>[29,30]</sup>,多种因素的综合作用造成土壤有机碳密度空间变异性增加。

#### 4.2 长江下游平原区乡村景观研究区域的土地利用/覆被及其土壤有机碳储量的评价

采用 12 个具有区域代表性的乡村景观样方来评价长江下游平原区乡村景观研究区域的土地利用/覆被类型面积及其土壤有机碳储量(表 5 和公式 1~6)。有些生态立地类型因其区域权重很小而未取样,则首先用其所属的地形和土地利用/覆被组合类型(FUC)的土壤有机碳密度均值替代,如不符合,再用其所属土地利用/覆被类型(UC)的土壤有机碳密度均值替代,如还不符合,最后用其所属的陆地的所有类型土壤有机碳密度均值或水域及水陆交界带的所有类型淤泥有机碳密度均值分别替代。

表 4 0~30cm 淤泥有机碳密度

Table 4 The sediment SOC density in 0~30 cm layer for ecotope classes

生态立地 Ecotope code and description	样本数 Sample number	均值 (0~30cm) Mean <sup>§</sup> (t/hm <sup>2</sup> )	变异系数 CV(%) §
MAFAhv01 静水沼泽中水草 Fallow persistent emergent grass-like vegetation in marsh	3	41.97a	6%
CMDAhv01 运河边水草(人为干扰) Disturbed persistent emergent grass-like vegetation on canal margin	3	32.82b	8%
PAAWaq07 管理面积 < 0.1hm <sup>2</sup> 的水产养殖塘 Small-scale generic freshwater livestock culture in small pond	3	27.93bc	10%
PBAWaq14 管理面积 0.1~1 hm <sup>2</sup> 的螃蟹养殖塘 Medium-scale generic freshwater crab culture in large pond	5	27.29bc	8%
PBAWaq08 管理面积 0.1~1 hm <sup>2</sup> 的水产养殖塘 Medium-scale generic freshwater livestock culture in large pond	9	26.09bc	6%
FMFAhv01 活水沼泽中水草区(无人干扰) Fallow persistent emergent grass-like vegetation in flowing marsh	8	24.73bc	7%
CAAWaq08 宽 < 30m 的运河中 0.1~1hm <sup>2</sup> 管理面积的水产养殖区 Medium-scale generic freshwater livestock culture in small canal	5	24.61bc	8%
CBFWwa02 宽 > 30m 的运河中闲置水域 Fallow water in large canal	7	23.61bc	7%
CAFWwa02 宽 < 30m 的运河中闲置水域 Fallow water in small canal	8	21.87c	7%
汇总 Total	51	26.28	3%

§:不同的字母表示 SNK 统计检验 ( $p < 0.05$ ) 差异显著 Means of ecotope classes with different letters are statistically significantly different ( $p < 0.05$ ) as tested using Student-Newman-Keuls (SNK) from CLM ( $p < 0.001$ ); §: 均值标准误/均值; SE / Mean

在 Landsat 影像覆盖的  $2.13 \times 10^6$  hm<sup>2</sup> 的长江下游平原区乡村景观研究区域,0~30cm 土层有机碳储量为 76.97Tg(表 6)。在区域乡村景观中,水田的面积和土壤有机碳储量均占据绝对优势,分别为 42% 和 48%(图 2 和表 6);其次是水产养殖,其面积和有机碳储量分别为 15% 和 11%;非渗漏性建筑用地,旱地一年生作物和水浇地多年生作物的面积和土壤有机碳储量均在 5%~10% 之间;上述 5 种类型是长江下游平原区最主要的土地利用/覆被类型,其面积和土壤有机碳储量百分数总和分别为 83% 和 85%。其余的类型的面积和土壤有机碳储量均低于 5%(图 2)。

耕地类型(PA, RA, IP, IA, RP, IM, RM)面积总计  $1.35 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>(图 2 和表 6),占区域乡村景观面积的 63%;水田(PA)、水浇地(IP, IA, IM)和旱地(RA, RP, RM)分别占耕地类型总面积的 67%、17% 和 16%。耕地类型的土壤有机碳储量总计 53.95Tg,占总储量的 70%;水田,旱地和水浇地的土壤有机碳储量分别占耕地类型总储量的 68%、17% 和 14%。耕地类型中面积较大的生态立地类型有(表 6):平原稻田(FPPAr01),水浇地桑树(FPIPdw39),平原及人工地段的旱地一年生

表 5 乡村景观样方的区域权重系数

Table 5 CDW (%) of sample cells for estimating village landscape of Yangtze Delta Plain and Yixing Municipal, respectively

景观样方 Sample cell	长江下游平原区 CDW(%) For Yangtze Delta Plain	宜兴市域 CDW(%) For Yixing Municipal
R10 . C05	24.60	9.70
R09 . C19	24.10	33.40
R05 . C05	13.80	5.50
R07 . C29	9.70	13.20
R09 . C29	8.20	11.40
R05 . C19	7.70	10.50
R08 . C14	5.60	7.60
R09 . C14	2.70	3.80
R06 . C05	1.90	2.60
R06 . C19	0.90	1.20
R09 . C13	0.50	0.70
R08 . C13	0.20	0.30



作物(FPRAac04, ANRAac04)和旱地蔬菜(FPRAac01)等,尤其是平原稻田居绝对优势。

水产养殖(AW)的面积和土壤有机碳储量仅次于水田,养殖规模在 $0.1 \sim 1 \text{ hm}^2$  (aq08 和 aq14)和大于 $1 \text{ hm}^2$  (aq09)面积占据绝对优势;而小于 $0.1 \text{ hm}^2$  (aq07)的生态立地较少,在区域乡村景观中不足1%。就面积大于0.5%的生态立地来看,全部的运河养殖(CB 和 CA)与池塘养殖(PB 和 PA)面积比例相当,分别为7.4%和7.1%(表6)。

非渗漏性建筑用地(CS)的面积和土壤有机碳储量居第三,其中面积较大的生态立地类型为:成片楼房群(ANCSHo04),非渗漏性道路(ANCSr02)和公共建筑(ANCSnb06)等。

### 4.3 讨论

验证区域土地利用/覆被面积的尺度推绎结果通常是比较困难的,可以采取的方式之一是在区域中相对较小的范围内验证。本研究利用区域权重系数评价了宜兴市域乡村景观的土地利用/覆被面积,并且与该范围内土地利用现状调查资料做了对比验证(表7)。

由于宜兴市域边界的不规则性,在其边界线存在不完整的聚类单元格( $500\text{m} \times 500\text{m}$  cells),其乡村景观面积计算方法是:将不完整的单元格去除,剩余单元格面积作为宜兴市域中乡村景观的最小面积,而将那些不完整的单元格按照完整单元计算,其面积作为市域乡村景观的最大面积。取二者平均值作为市域乡村景观的近似面积,并计算12个样方代表宜兴市域的区域权重系数(CDW),本研究采用市域乡村景观的区域权重系数平均值进行评价计算(表5和表7)。

区域权重系数评价的宜兴市乡村景观总面积和土地利用调查面积相差 $0.65 \times 10^3 \text{ hm}^2$ ,相对偏差为0.1%(表7)。水田评价面积比调查面积少 $2.95 \times 10^3 \text{ hm}^2$ ,相对偏差约1.4%;多年生作物评价面积比调查面积多 $0.42 \times 10^3 \text{ hm}^2$ ,相对偏差为1.9%。而耕地类型中,旱地和水浇地评价面积与调查面积的相对偏差较大,尤其是后者,相对偏差高达33.3%。另外,水域和水陆交界带、建筑用地、多年生非农作物和一年生非农作物的评价面积与调查面积的相对偏差 $< 4.0\%$ ;其它类型的相对偏差最大。两种方法的土地利用/覆被类型的绝对偏差面积在 $0.02 \times 10^3 \sim 2.95 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 之间,最大偏差面积占总面积的2.6%左右。

造成偏差的原因一是:由于两个分类系统存在差异,对两个系统的类型重新归类时产生偏差。原因二是:可能是景观样方分布区域范围比较窄,随着区域范围的扩大,相似度会降低,在评价某些具体类型时,出现较大的偏差。可以通过将景观样方在区域内分布的更加分散以及增加样方数量来改善评价的精确度。原因三是:土地利用调查的结果同样也会存在一定的误差或偏差。

总体来看,区域权重系数评价结果与土地利用调查数据非常接近,尤其是在评价较大面积的土地利用覆被类型时。

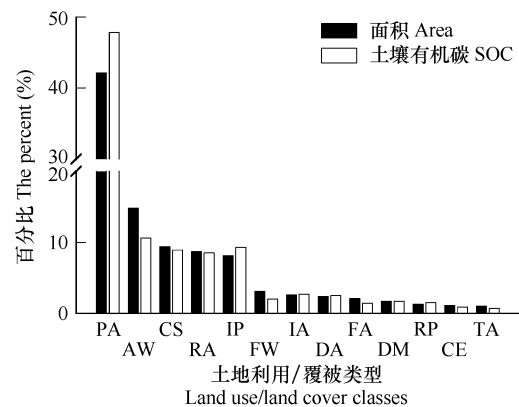


图2 长江下游平原区土地利用/覆被的面积及其土壤有机碳储量比例

(Fig. 2 The area percent and the SOC percent of land use/land cover in the Yangtze Delta Plain, respectively)

PA: 水田 Paddy & other flooded crops; AW: 水产养殖 Aquaculture; CS: 非渗漏性建筑地面 Built structures with impervious cover; RA: 旱地1年生作物 Rainfed annual croplands; IP: 水浇地多年生作物 Irrigated perennial croplands; FW: 闲置水域 Fallow water; IA: 水浇地1年生作物 Irrigated annual croplands; DA: 1年生植物覆被的干扰地类 Disturbed area covered annual herbaceous vegetation; FA: 1年生植被覆被的休闲地类 Fallow area covered annual herbaceous vegetation; DM: 混合植被覆被的干扰地类 Disturbed area covered mixed of herbaceous, open woody & tree cover; RP: 旱地多年生作物 Rainfed perennial croplands; CE: 渗漏性建筑地面 Built structures with bare soil; TA: 人工种植的草本植物 Managed for regular harvest of non-crop herbaceous vegetation; 注: 仅绘出面积 $> 1.0\%$ 的土地利用/覆被类型 Note: Land use/land cover classes that area are  $> 1.0\%$  only are charted

表 6 长江下游平原乡村景观研究区域的土地利用覆被面积及其 0~30 土层有机碳储量

Table 6 Ecotope area and SOC storage in village landscape of the studied region on Yangtze Delta Plain

土地利用/覆被及其生态立地类型 Land use/land cover and ecotope code	面积比例 (%) Area of total	面积 Area (10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> )	有机碳储量比例 (%) SOC of total	有机碳储量 SOC(Tg)
水田 Paddy & other flooded crops	42.1	894.67	47.8	36.77
FPPAri01	41.9	890.52	47.6	36.6
水产养殖 Aquaculture	14.8	313.93	10.6	8.18
PBAWaq08	5.0	105.70	3.6	2.76
CBAWaq09	4.8	101.76	3.5	2.67
CAAWaq08	2.6	55.00	1.8	1.35
PBAWaq14	1.0	21.48	0.8	0.59
PAAWaq07	0.6	11.89	0.4	0.33
PBAWaq09	0.5	9.78	0.3	0.26
非渗透性建设用地 Built structures with impervious cover	9.4	200.88	8.9	6.83
ANCSHo04	7.0	148.24	6.7	5.17
ANCSr02	1.2	25.58	1.1	0.87
ANCSnb06	0.5	10.00	0.3	0.22
旱地 1 年生作物 Rainfed annual croplands	8.7	184.94	8.5	6.54
FPRAc04	4.8	102.44	4.8	3.66
ANRAac04	2.9	61.86	2.8	2.14
FPRAc01	0.9	18.66	0.9	0.67
水浇地多年生作物 Irrigated perennial croplands	8.1	172.19	9.3	7.13
FPIPdw39	8.1	171.83	9.2	7.12
全部 § Total		2127.48		76.97

注: 仅列出面积 > 5.0% 的土地利用/覆被类型及其包含的面积 > 0.5% 的生态立地类型; Land use / land cover classes that area are > 5.0% only are listed, in which ecotope classes are comprised and are list only that area are > 0.5%; 生态立地描述见表 3 和表 4; Ecotope description is saw in table 3 and table 4; §: 长江下游平原乡村景观研究区域的总面积及 0~30cm 土壤有机碳总储量; The total area and 0~30cm SOC storage of village landscape of the studied region on Yangtze Delta Plain

表 7 宜兴市域乡村景观土地利用/覆被评价面积和土地利用调查面积比较

Table 7 Comparison of estimating land use and land cover areas with surveying land use area in the village landscape of Yixing Municipal

比较类型 Compared code	土地利用/覆被评价面积 § Estimating Area (10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> )	土地利用调查面积 Surveying Area (10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> )	绝对偏差 § Area deviation (10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> )	相对偏差 § § Relative deviation (%)
水田 Paddy	51.76	54.71	- 2.95	- 1.4
水域和水陆交界带 Aquatic and transitional	26.68	24.43	2.25	2.2
建筑用地 Built-up structures	12.15	14.14	- 1.99	- 3.8
旱地 Rainfed croplands	10.16	7.27	2.89	8.3
多年生作物 Perennial woody crops	5.77	5.35	0.42	1.9
多年生非农作物 Perennial woody vegetation	3.57	3.60	- 0.02	- 0.2
1 年生非农作物 Annual herbaceous vegetation	2.53	2.51	0.03	0.3
水浇地 Irrigated croplands	1.92	0.39	1.53	33.3
其它类型 Other types	0.19	1.69	- 1.49	- 39.8
汇总 Total	114.74	114.09	0.65	0.1

§: 利用 CDW 评价的土地利用/覆被类型面积 (a); The area of the land use / land cover classes was estimated using the regional weighted (CDW); § §: 土地利用调查面积 (b), 资料来源于《江苏省宜兴市耕地地力调查与质量评价》; The surveying area of the land use classes came from Arable Land Quality Survey and Appraisal of Yixing Municipal in Jiangsu Province; § §: 绝对偏差 (Area deviation) = a - b; § § §: 相对偏差 (Relative deviation) = (a - b) / [(a + b) / 2]

乡村景观土壤有机碳密度是否具有区域代表性,是在区域土壤有机碳储量的评价中产生不确定性的另外一个重要因素。为此,本研究与其它研究结果进行了比较(表 8),由于区域中水田面积占据绝对优势,所以仅对水稻土进行比较。本研究水稻土 0~15cm 土壤有机碳含量与近期宜兴市耕地地力调查(68 个土样)结果相近,但是土壤容重值相对较低,故有机碳密度值相对较低;与近期张琪等研究(61 个土样)<sup>[30]</sup>结果相比,本研究的水稻土有机碳含量,土壤容重和有机碳密度均相对较低,但是 0~15cm 土壤有机碳含量范围与其测定土

类有机碳含量均值范围(10.99~19.02g/kg)相似。本研究0~15cm土壤有机碳含量均值略高于1994年测定结果(14.62g/kg)和1983年测定结果(12.31g/kg),但由于土壤容重较低,土壤有机碳密度低于1994年并与1983年相当<sup>[30]</sup>。总的看来,宜兴市域的水稻土0~15cm有机碳含量是呈现增加趋势。与李恋卿等统计的江苏省耕层(0~25cm)土壤有机碳结果相比<sup>[23]</sup>,本研究0~30cm土壤有机碳含量高于江苏省平均值(9.17g/kg)但低于太湖地区平均值(14.04g/kg),本研究的土壤有机碳含量(12.74g/kg)在太湖地区,里下河地区和宁镇丘陵区的土壤有机碳含量范围之间。俞海等引用南京土壤所“土壤质量演变规律及土壤资源可持续利用”资料表明<sup>[38]</sup>:80年代初,长江下游地区土壤(主要是水稻土)有机碳12.88g/kg(有机质22.20g/kg),2000年上升到16.45g/kg(有机质28.37g/kg),增长比例为27.8%。调查的100个样点中,其中85%的土壤有机碳(或有机质)增加,只有15%下降。本研究的测定结果也证实了该区域土壤有机碳增加趋势。

表8 本研究的水稻土有机碳测定数据与其它研究比较

Table 8 Comparing SOC, bulk density, thickness and SOC density with other study references

采样区域 Region of sample soil	有机碳含量 SOC (g/kg)	土壤容重 Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	土层厚度 Thickness (cm)	有机碳密度 SOC density (t/hm <sup>2</sup> )	说明 Note
宜兴市 Yixing Municipal	15.78 ±4.98 <sup>§</sup>	1.05 ±0.15	0~15	24.15 ±5.91	水稻土(2005) <sup>§</sup>
宜兴市 Yixing Municipal	9.71 ±4.25	1.20 ±0.13	15~30	16.95 ±6.47	水稻土(2005) <sup>§</sup>
宜兴市 Yixing Municipal	12.74 ±2.58	1.13 ±0.09	0~30	41.10 ±6.96	水稻土(2005) <sup>§</sup>
宜兴市 Yixing Municipal	15.19 ±1.96	1.30	0~15	29.62	水稻土(2003)
宜兴市 Yixing Municipal	17.14	1.28	0~15	32.92	水稻土(2002) <sup>[30]</sup>
宜兴市 Yixing Municipal	14.62	1.30	0~15	28.50	水稻土(1994) <sup>[30]</sup>
宜兴市 Yixing Municipal	12.31	1.30	0~15	24.01	水稻土(1983) <sup>[30]</sup>
江苏省 Jiangsu Province	9.17	1.30	0~25	29.80	农田土壤(SNSSC) <sup>*[23]</sup>
太湖地区 Taihu Region	14.04	1.30	0~25	45.63	农田土壤(SNSSC) <sup>*[23]</sup>
里下河地区 Lixiahe Region	11.72	1.30	0~25	38.09	农田土壤(SNSSC) <sup>*[23]</sup>
宁镇丘陵地区 Ningzhen Hill Region	10.09	1.30	0~25	32.79	农田土壤(SNSSC) <sup>*[23]</sup>
沿江高沙土地区 Region along Yangtze River	8.47	1.30	0~25	27.53	农田土壤(SNSSC) <sup>*[23]</sup>
滨海盐土地区 Region along the coast	7.31	1.30	0~25	23.76	农田土壤(SNSSC) <sup>*[23]</sup>
徐淮地区 Xuhui Region	6.73	1.30	0~25	21.87	农田土壤(SNSSC) <sup>*[23]</sup>
中国东部(耕层) East China (plow layer)	15.86 ±4.42	1.18 ±0.17	14.13 ±1.73	26.06 ±7.78	水稻土(SNSSC) <sup>[14]</sup>
中国东部(犁底层) East China (plowpan)	12.39 ±5.74	1.38 ±0.19	9.46 ±2.97	15.90 ±8.81	水稻土(SNSSC) <sup>[14]</sup>
中国(耕层) China (plow layer)	16.58 ±5.81	1.18 ±0.14	15.28 ±2.61	29.48 ±11.35	水稻土(SNSSC) <sup>[14]</sup>
中国(犁底层) China (plowpan)	2.66 ±6.77	1.38 ±0.13	10.24 ±5.11	17.43 ±13.38	水稻土(SNSSC) <sup>[14]</sup>
中国(表土层) China (whole topsoil)	15.01 ±6.20	1.26 ±0.14	25.52 ±7.71	46.91 ±25.73	水稻土(SNSSC) <sup>[14]</sup>

§:标准方差 Standard deviations; :文献中容重未标明的,以1.30g/cm<sup>3</sup>值替代, Bulk density that was not shown in the reference was filled in with 1.30g/cm<sup>3</sup>, §:本研究土壤测定时间 The study time of sample soil \*SNSSC 全国第二次土壤普查, The second national soil survey of China

本研究0~15cm土壤有机碳含量值与全国第二次土壤普查的东部省市水稻土耕层统计数据非常相似(表8),土壤容重和有机碳密度也相差不大,而15~30cm土层有机碳含量和土壤容重均低于东部省市水稻土犁底层统计结果;而全国水稻土耕层和表层的土壤有机碳含量,容重和有机碳密度都高于本研究0~15cm和0~30cm的测定值<sup>[14]</sup>。表明长江下游地区土壤有机碳仍处于中等水平<sup>[38]</sup>。

总之,本研究的乡村景观样方分布区域虽然相对较小,但是涵盖了区域内绝大多数土地利用及覆被类型,且这些类型的土壤有机碳测定范围,尤其是水稻土,是具有区域代表性的,用于计算区域土壤有机碳储量时产生的不确定性是能够控制在比较小的范围内。

通常的区域土壤有机碳的评价常常采用土壤类型法,该方法侧重于土壤种类本身对于土壤有机碳的影响,忽略了土地利用,覆被和管理等人为影响因素对土壤有机碳的影响作用<sup>[13~25]</sup>,此外,一般的土壤类型图比例尺较大,而土壤类型面积统计资料的精确度还有待于进一步提高,通常的方法用于评价乡村景观中的土壤有机碳储量时,可能产生较大的偏差。

依据土壤类型法计算,宜兴市四种主要的水稻土属类型面积共计65.59×10<sup>3</sup>hm<sup>2</sup>,占宜兴市域水稻土面积

的90%,其0~15cm土壤有机碳储量为2.20Tg<sup>[30]</sup>。本研究评价的宜兴市乡村景观中水田面积为51.76×10<sup>3</sup>hm<sup>2</sup>,0~15cm土壤有机碳储量为1.25Tg,由于宜兴市域乡村景观范围仅是全市范围的一部分,故水稻的评价面积小于实际面积(53.87×10<sup>3</sup>hm<sup>2</sup>,2002年宜兴市水稻种植统计面积)。而114.74×10<sup>3</sup>hm<sup>2</sup>宜兴市乡村景观,其0~15cm土壤层有机碳储量为2.35Tg。说明两种方法在评价土壤有机碳储量有较大的差异,差异来自于面积和土壤有机碳密度,尤其是前者更为突出。

区域土壤有机碳储量评价的不确定性来源最主要是评价类型的面积和土壤有机碳密度,而前者因其数量级较大,对计算的不确定性影响起关键性作用。通常在区域评价中,对于土壤类型面积的更精确的评价是非常困难的,需要投入巨大的人力和财力以及周密的组织和专业的调查等。相对而言,不论在小尺度还是大尺度,土地利用/覆被面积及其土壤有机碳密度的评价都更加容易些。

本研究的区域评价方法与通常的方法相比,显著的特征是:重视了<30m分辨率的均质景观缀块的分类及绘图,能够较真实地反映人口密集的乡村景观中细微尺度的土地利用和覆被的复杂格局<sup>[3,4,34~37]</sup>,而且在所识别的生态立地类型中,一些类型间土壤有机碳密度存在显著差异,验证了这些生态立地类型在土地管理及生态过程(如在区域碳循环的作用)的异质性。对区域评价时综合运用了由大尺度到小尺度的取样方法和由小尺度到大尺度的推绎方法,利用区域权重系数进行评价计算,能够比较准确的评价区域中较大的类型面积;并且依据生态立地区域权重且采用分层取样方法,土壤有机碳含量与区域土壤有机碳含量范围的偏离较小。虽然本研究的方法仍然存在一定的不确定性,总的来看,该方法有助于提高区域土地利用覆被和有机碳库估算的精确性。

区域土壤有机碳研究中,土壤取样和测定方法应当使用统一的标准,有利于不同研究结果的比较分析。区域土壤有机碳计算比较理想的方法是:兼顾土地利用/覆被类型和土壤类型进行计算,结果会比单纯使用一种方法更加准确,对于计算结果进行不确定性评价也是十分必要的。

## References:

- [1] Houghton R A, Martin R E. Effect of land-use change on the carbon balance of terrestrial ecosystems. In: DeFries R S, Asner G P, Houghton R A eds. Ecosystems and land use change. Geophysical Monographs. American Geophysical Union, Washington, D C. 2004. 153: 85 ~ 98.
- [2] Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850 ~ 2000. Tellus, 2003, 55B: 378 ~ 390.
- [3] Ellis E C, Li R G, Yang L Z, et al. Long-term change in village scale ecosystems in China using landscape and statistical methods. Ecological Applications, 2000, 10(4): 1057 ~ 1073.
- [4] Ellis E C. Long-term ecological changes in the densely populated rural landscapes of China. In: DeFries R S, Asner G P, Houghton R A eds. Ecosystems and land use change. Geophysical Monographs. American Geophysical Union, Washington, D C. 2004, 153: 303 ~ 320
- [5] Verburg P H, Veldkamp A, Fresco L O. Simulation of changes in the spatial pattern of land use in China. Applied Geography, 1999, 19 (3): 211 ~ 233.
- [6] Wang S Q, Xu J, Zhou C H. Using remote sensing to estimate the change of carbon storage: a case study in the estuary of Yellow River delta. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(8): 1565 ~ 1580.
- [7] Liu J Y, Liu M L, Tian H Q, et al. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990 ~ 2000: An analysis based on Landsat TM data. Remote Sensing of Environment, 2005, 98: 442 ~ 456.
- [8] Zhan X, Defries R, Townshend J R G, et al. The 250m global land cover change product from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer of NASA's Earth Observing System. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(6&7): 1433 ~ 1460.
- [9] Liu J Y, Zhuang D F, Luo D, et al. Land-cover classification of China: integrated analysis of AVHRR imagery and geophysical data. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(12): 2485 ~ 2500.
- [10] Loveland T R, Reed B C, Brown J F, et al. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(6&7): 1303 ~ 1330.
- [11] Froliking S, Xiao X M, Zhuang Y H, et al. Agricultural land-use in China: a comparison of area estimates from ground-based census and satellite-borne remote sensing. Global Ecology and Biogeography, 1999, 8: 407 ~ 416.
- [12] Lepers E, Lambin F E, Janetos C A, et al. A synthesis of information on rapid land-cover change for the period 1981 ~ 2000. Bioscience, 2005, 55(2): 115 ~ 124.
- [13] Wang S Q, Tian H Q, Liu J Y, et al. Pattern and change of soil organic carbon storage in China: 1960s ~ 1980s. Tellus, 2003, 55B: 416 ~ 427.
- [14] Pan G X, Li L Q, Wu L S, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils. Global Change Biology, 2003, 10: 79 ~ 92.
- [15] Wu H B, Gao Z T, Peng C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soil of China. Global Change Biology, 2003, 9: 305 ~ 315.
- [16] Zhong L, Zhao Q G. Organic carbon content and distribution in soils under different land uses in tropical and subtropical China. Plant and Soil, 2001, 231: 175 ~ 185.
- [17] Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China. Bulletin of Science and Technology, 1999, 15(5): 330 ~ 332.

- [18] Wang S Q, Zhou C H. Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China. *Geographical Research*, 1999, 18(4): 349 ~ 356.
- [19] Wang S Q, Zhou C H, Li K R, et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 533 ~ 544.
- [20] Wang S Q, Liu J Y, Yu G R. Error analysis of estimating terrestrial soil organic carbon storage in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 797 ~ 802.
- [21] Xie X L, Sun B, Zhou H Z, et al. Organic carbon density and storage in soil of China and spatial analysis. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 35 ~ 43.
- [22] Yu D S, Shi X Z, Sun W X, et al. Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1 1000000 soil database. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2279 ~ 2283.
- [23] Li L Q, Pan G X. Estimation of cropland soil organic carbon density and storage in Jiangsu Province. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 1999, 15(6): 41 ~ 44.
- [24] Liu G H, Fu B J, Wu G, et al. Soil organic carbon pool and its spatial distribution pattern in the Circum Bohai Region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(9): 1489 ~ 1493.
- [25] Jiang X S, Pan J J, Li X L. Organic carbon density and storage in topsoil of Jiangsu and spatial analysis. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(4): 501 ~ 503.
- [26] Shen Y, Huang Y, Zong L G, et al. Simulation and prediction of soil organic carbon dynamics in Jiangsu Province based on model and GIS techniques. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(11): 1312 ~ 1317.
- [27] Chen F, Pu L J, Cao H, et al. Spatial and temporal changes of soil nutrients and their mechanism in typical area of Taihu Lake valley during the past two decades. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 236 ~ 245.
- [28] Gao C, Zhang T L, Wu W D. Agricultural soil nutrient status in Taihu Lake Area and its implication to nutrient management strategies. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(5): 428 ~ 432.
- [29] Li L Q, Pan G X, Gong W, et al. Organic carbon storage in selected paddy soil in Taihu Lake Region and their occurrence. *Bulletin of Science and Technology*, 2000, 16(6): 421 ~ 432.
- [30] Zhang Q, Li L Q, Pan G X, et al. Dynamics of topsoil organic carbon of paddy soils at Yixing over the last 20 years and the driving factors. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(2): 236 ~ 242.
- [31] Fu B J, Gao X D, Chen L D, et al. Land use changes and soil nutrient changes: a case study in Zunhua County, Hebei Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(6): 926 ~ 931.
- [32] Kong X B, Zhang F R, Qi W, et al. The influence of land use change on soil fertility in intensive agricultural region: a case study of Quzhou County, Hebei. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(3): 333 ~ 342.
- [33] Wang H Q, Ellis E C. Spatial accuracy of orthorectified IKONOS imagery and historical aerial photographs across five sites in China. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26: 1893 ~ 1911.
- [34] Ellis E C, Wang H Q, Xiao H S, et al. Measuring long-term ecological changes in densely populated landscapes using current and historical high resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100: 457 ~ 473.
- [35] Ellis E C, Li R G, Yang L Z, et al. Changes in village-scale nitrogen storage in China's Tai Lake Region. *Ecological Applications*, 2000, 10: 1074 ~ 1089.
- [36] Li S C, Liu W Q, Cheng X, et al. Characteristic study on village landscape patterns in Sichuan Basin hilly region based on high resolution IKONOS remote sensing. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10): 1830 ~ 1837.
- [37] Ruan R Z, Ellis E C. An illustrative study on local landscape based on IKONOS. *Remote Sensing Information*, 2005, 3: 14 ~ 17.
- [38] Yu H, Huang J K, Scott R, et al. Soil fertility changes of cultivated land in Eastern China. *Geographical Research*, 2003, 22(3): 380 ~ 388.

#### 参考文献:

- [17] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究. *科技通报*, 1999, 15(5): 330 ~ 332.
- [18] 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算. *地理研究*, 1999, 18(4): 349 ~ 356.
- [19] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 533 ~ 544.
- [20] 王绍强, 刘纪远, 于贵瑞. 中国陆地土壤有机碳蓄积量估算误差分析. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 797 ~ 802.
- [21] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35 ~ 43.
- [22] 于东升, 史学正, 孙维侠, 等. 基于 1 100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2279 ~ 2283.
- [23] 李恋卿, 潘根兴. 江苏省农地土壤有机碳及碳截存动态研究. *中国农学通报*, 1999, 15(6): 41 ~ 44.
- [24] 刘国华, 傅伯杰, 吴钢, 等. 环渤海地区土壤有机碳库及其空间分布格局的研究. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1489 ~ 1493.
- [25] 姜小三, 潘剑君, 李学林. 江苏表层土壤有机碳密度和储量估算和空间分布分析. *土壤通报*, 2005, 36(4): 501 ~ 503.
- [26] 沈雨, 黄耀, 宗良纲, 等. 基于模型和 GIS 的江苏省农田土壤有机碳变化研究. *中国农业科学*, 2003, 36(11): 1312 ~ 1317.
- [27] 陈浮, 濮励杰, 曹慧, 等. 近 20 年太湖流域典型区土壤养分时空变化及驱动机理. *土壤学报*, 2002, 39(2): 236 ~ 245.
- [28] 高超, 张桃林, 吴薇东. 太湖地区农田土壤养分动态及其启示. *地理科学*, 2001, 21(5): 428 ~ 432.
- [29] 李恋卿, 潘根兴, 龚伟, 等. 太湖地区几种水稻土的有机碳储存及其分布特性. *科技通报*, 2000, 16(6): 421 ~ 432.
- [30] 张琪, 李恋卿, 潘根兴, 等. 近 20 年来宜兴市域水稻土有机碳动态及其驱动因素. *第四纪研究*, 2004, 24(2): 236 ~ 242.
- [31] 傅伯杰, 郭旭东, 陈利顶, 等. 土地利用变化与土壤养分的变化——以河北省遵化县为例. *生态学报*, 2001, 21(6): 926 ~ 931.
- [32] 孔祥斌, 张凤荣, 齐伟, 等. 集约化农区土地利用变化对土壤养分的影响——以河北省曲周县为例. *地理学报*, 2003, 58(3): 333 ~ 342.
- [36] 李首成, 刘文全, 程序, 等. 基于高分辨率卫星图的川中丘陵区村级景观格局特征研究. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1830 ~ 1837.
- [37] 阮仁宗, Ellis E C. 利用 IKONOS 进行局部景观生态研究. *遥感信息*, 2005, 3: 14 ~ 17.
- [38] 俞海, 黄季焜, Scott Rozelle, 等. 中国东部地区耕地土壤肥力变化趋势研究. *地理研究*, 2003, 22(3): 380 ~ 388.