

# 基于土地利用变化建立土壤质量评价最小数据集\*

李桂林<sup>1,2</sup> 陈杰<sup>1</sup> 檀满枝<sup>1</sup> 孙志英<sup>1,2</sup>

(1 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)

(2 中国科学院城市环境研究所, 福建厦门 361003)

**摘要** 基于研究区 194 个土壤样点数据, 利用方差分析、主成分分析及其他相关统计方法确定了苏州市土壤质量评价最小数据集(MDS)。与先前研究不同的是, 本研究将土地利用方式及利用年限对土壤质量的影响作为进入 MDS 的衡量标准之一; 此外, 计算了每个候选的土壤理化变量在所有主成分上的综合荷载, 而不是只比较该变量在某一个主成分上的荷载就剔除其他变量, 从而避免了丢失过多的土壤质量信息。最后对该方法的可靠性从不同角度进行了验证, 对 54 个黄泥土样点、77 个黄松土样点及所有 194 个样点数据分别采用该 MDS 确定方法, 得到了同样的最小数据集。这说明该方法具有很好的稳定性、可重复性, 加以完善后, 本方法完全可以借鉴到其他地区, 从而一定程度上能够克服由于我国地域广、各地情况差异大而采用不同的土壤质量评价方法, 最后得到的评价结果难以比较的缺点。

**关键词** 土壤质量评价; 最小数据集; 土地利用变化; 多元统计; 苏州

**中图分类号** S159 **文献标识码** A

土壤质量是土壤学研究的焦点之一, 尽管土壤质量评价研究已在世界范围内广泛开展, 但迄今为止, 土壤质量的概念及其评价方法仍旧争议不断<sup>[1~6]</sup>。过去 10 年内, 在 CAB 数据库中有 1 600 多篇论文在讨论/土壤质量, 但大多在探讨土壤质量的定义, 只有不到 20% 集中在土壤质量水平的估计及寻找科学合理的定量评价方法上。这在一定程度上反映了土壤质量评价的难度, 主要是土壤质量评价因子的种类、数量都难以选取<sup>[7, 8]</sup>。土壤质量评价中因子的选择非常重要, 如果参评因子没有严格的选择, 土壤质量评价是没有任何意义的<sup>[7]</sup>。许多的理化、生物学属性都可能是参评因子, 但由于土地利用方式的多变性、土壤性质的时空变异性及数据获取的成本高等因素, 显然不可能获取所有因子的数据, 而只能确定一个/最小数据集( Minimum Dataset, MDS)<sup>[9]</sup>。

尽管世界范围内, 针对土壤质量评价最小数据集的确定已有相关研究围绕尺度<sup>[10, 11]</sup>、精度及实用性<sup>[12, 13]</sup>、评价方法<sup>[8, 14, 15]</sup>等角度展开, 但大多从大量的实验分析数据中简单的运用主成分分析(PCA)等统计方法得到包含相对较少因子数量的评价数据

集。如 Wang 等<sup>[8]</sup>利用 PCA 法对 29 个土壤理化生物学性质统计分析最后确定以 6 个因子衡量土壤质量状况; FAO<sup>[16]</sup>则采用 18 个土壤物理、化学性质的数据集来评价土壤质量; 而美国比较流行的是利用基于植物生长模型的土壤分级(SRPG, the Soil Ratings for Plant Growth Model)进行土壤质量评价, 使用的数据为 USDA2NRCS 开发建立的包括土壤的物理、化学及地形景观数据在内的全美土壤数据库, 这个数据集中包含的评价因子最多<sup>[17]</sup>。我国目前已有大量关于土壤质量评价的工作, 但是多集中在评价方法讨论、隶属度确定等方面<sup>[18~21]</sup>, 而对最小数据集的研究相对少见, 且几乎都是通过专家经验及研究者对研究区域的熟悉程度人为主观的进行确定。尽管采用的评价程序、手段等都能与国际接轨, 由于评价之前对参与评价的 MDS 因子未经严格确定, 这导致我国很多的土壤质量评价工作相对国际同行更加粗糙, 很多甚至不考虑各土壤变量之间的共线性等问题而将所有能得到数据的因子都用来评价土壤质量<sup>[18, 22, 23]</sup>。这样分析了大量的土壤质量指标, 但结果反而不一定准确, 关键问题之一在于参评数据集因子未经严格选取。尽管上述国际、国内的土壤

\* 国家科技支撑计划项目(2006BAD05B02), 国家自然科学基金项目(40571065, 40701070)资助

- 通讯作者, E-mail: jchen@issas.ac.cn

作者简介: 李桂林(1979~), 男, 湖北钟祥人, 博士, 研究方向为城市化过程与土壤资源演变

收稿日期: 2006- 10- 02; 收到修改稿日期: 2007- 02- 13

质量评价体系目前在全球、国家、地区等尺度已经有一些应用<sup>[16]</sup>, 但却未量化的考虑土地利用变化因素对土壤质量评价因子选择的影响。主要因为土地利用本身就是很复杂的问题, 而土壤质量评价方法也还处于探索之中, 因此要将土地利用变化及利用年限对土壤质量的影响量化的考虑到土壤质量评价中更是面临着很大的挑战。而事实上, 不同的土地利用方式及利用年限直接导致不同的土壤的耕作、灌溉、田间管理措施等<sup>[24]</sup>, 进而对土壤性质、土壤质量产生深刻的影响<sup>[25~28]</sup>。由于土壤类型及土地利用方式的多样性, 从田间到区域等各种尺度的土壤质量评价最小数据集<sup>[14, 29, 30]</sup>常受到两方面的限制: 1 受特定地点的限制, 很难外推到其他甚至是相邻地区。° 最小数据集的开发很大程度上依赖于专家观点<sup>[12, 31]</sup>。鉴于以上研究现状, 另外考虑到目前我国经济快速转型、农业结构调整导致的土壤利用方式多样化、多变性、复杂性的特点, 本研究将提出一种有可能外推到区域情况完全不同的地区的方法, 有很强的现实意义。

## 1 材料与方方法

### 1.1 研究区概况

苏州市紧邻上海, 位于长江三角洲中心地区, 本文研究区所指的苏州市, 不包括所辖常熟市等五个

县级市, 面积 1 650 km<sup>2</sup> (不计辖区内太湖水面) (图 1)。苏州市气候温和、降水丰沛, 优越的农业气候条件及上千年的水稻种植使得苏州市土壤熟化程度高, 为全国高肥力优质土壤区之一。研究区内共有 20 种土壤类型 (图 2), 其中以在太湖地区广泛分布的黄泥土 (黏壤质普通筒育水耕人为土) 为主 (占土壤资源总面积的 40.17%), 其次是黄松土 (粉砂黏壤质普通筒育水耕人为土) (占 34.19%), 另外面积小于 1% 的有 8 种, 在 1%~2% 之间的有 6 种, 在 2%~3% 之间的有 4 种。近年来随着城市化进程迅猛发展, 城市人口食物消费结构的改变及农业结构的调整导致城镇周边土壤资源的利用形式从原来相对单一的水稻种植方式逐渐大量利用为菜地、旱地、林地、果园, 还有大片被征用为非农用地但目前保持弃荒的稻田。

### 1.1.2 样品采集与最小数据集评价方法

研究使用的数据来自于 2004 年 10 月下旬水稻刚收割还未施肥耕作前所采的位于苏州市城市边缘带的 194 个土壤表层 (0~20 cm) 样品, 样点分布见图 1。为便于研究土地利用变化对土壤质量演变的影响, 依以下三个原则布点采样: 属于同一土壤类型上的样点应尽量分布在不同土地利用方式上; 同一土壤利用方式下的样点应分布在尽量多的土壤类型上; 同一土壤利用方式下采集尽量多的不同利用年限的样点。采样过程中向当地农民详细调查每个采

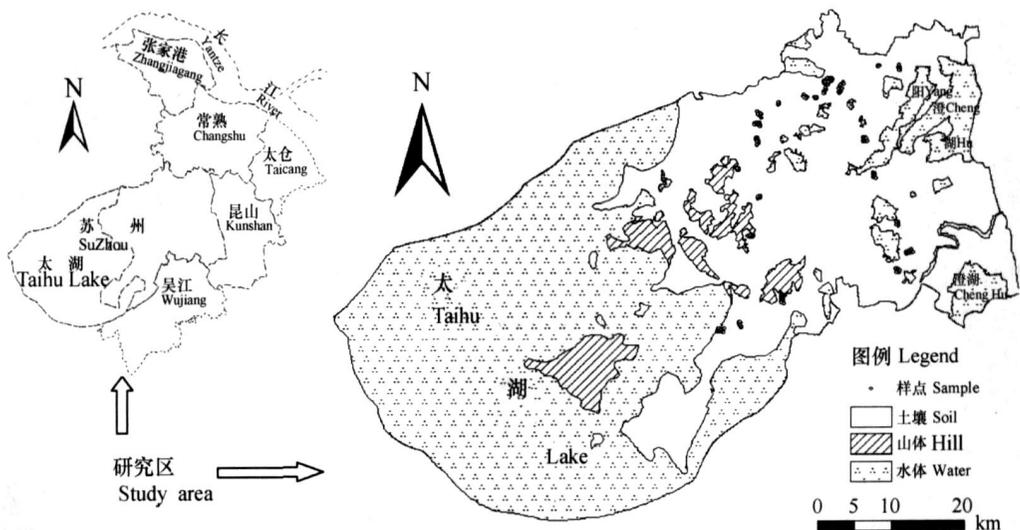
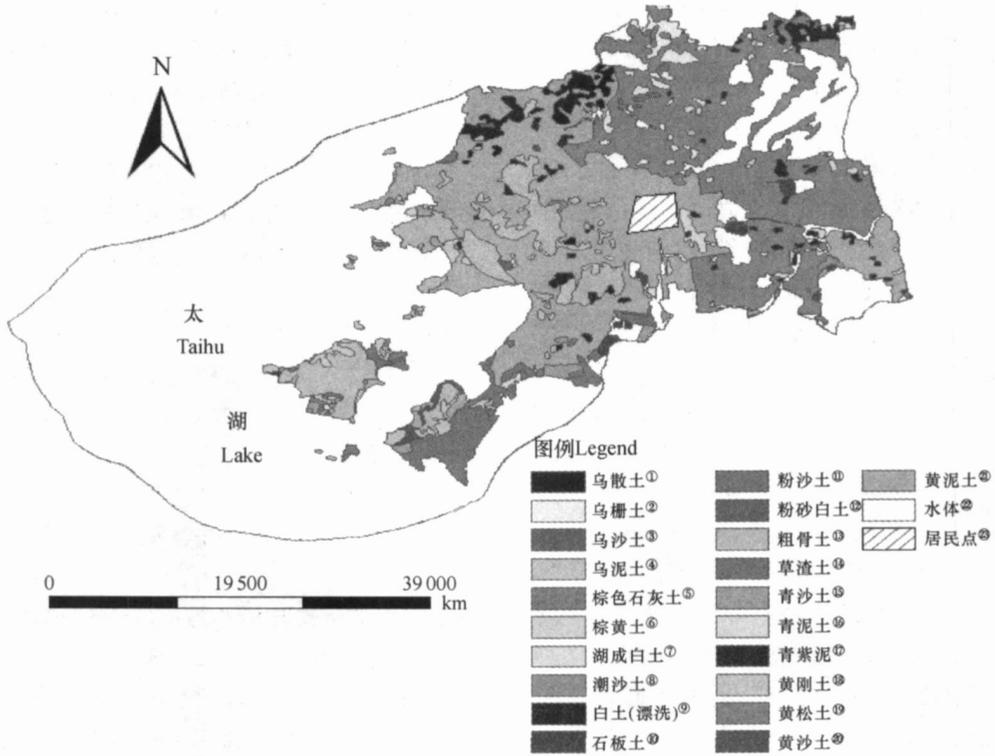


图 1 研究区地理位置及采样点分布

Fig. 1 Geographical location and sample distribution of the study area



<sup>1</sup> Clay loamy Fe-leached-gleyic stagnic anthrosol; <sup>°</sup> Clay loamy endogleyic Fe-leached stagnic anthrosol; <sup>»</sup> Sand loamy calcariotypic Fe-leached stagnic anthrosol; <sup>¼</sup> Clay endogleyic Fe-leached stagnic; <sup>½</sup> Loamy calcari ochric haplic cambosol; <sup>¾</sup> Loamy typic claypan udic argosol anthrosol; <sup>ı</sup> Sand loamy alb Fe-leached stagnic anthrosol; <sup>À</sup> Sand loamy calcari mottled udic orthic primosol; <sup>Á</sup> Sand loamy alb haplic stagnic anthrosol; <sup>Â</sup> Clay typic gleyic stagnic anthrosol; <sup>ıv</sup> Loamy typic haplic Fe-leached stagnic anthrosol; <sup>ıw</sup> Sandy alb Fe-leached haplic cambosol; <sup>k</sup> Clay loamy typic ferriudic argosol; <sup>y</sup> Clay loamy umbrihaplic stagnic gleyosol; <sup>ı</sup> Sand loamy anthrostagnic haplic stagnic gleyosol; <sup>ıı</sup> Clay loamy typic haplic stagnic gleyosol; <sup>ııı</sup> Clay Fe-leached gleyic stagnic anthrosol; <sup>ıııı</sup> Clay loamy typic claypan udic argosol; <sup>ııııı</sup> Fine sand clay loamy typic haplic stagnic anthrosol; <sup>m</sup> Sandy calcari typic udic orthic primosol; <sup>m</sup> Clay loamy typic haplic stagnic anthrosol; <sup>m</sup> Water body; <sup>m</sup> Resident area

图2 土壤类型图  
Fig. 2 Soil map of the study area

样点所在的土地利用方式的种植年限等相关信息。最后,共采到10种土壤类型、6种土壤利用方式及每种利用方式上不同种植年限的土壤样品共201个,去除极端异常值后用于确定MDS的样品共194个。各利用方式及其相应的种植年限分别为:水稻田(土地利用的初始状态,其他利用方式基本上均由水稻田利用方式转化而来,故定义年限为0,共96个样品)、荒地(1 a, 3 a, 5 a,共52个样品)、菜地(2 a, 5 a, 10 a,共15个样品)、林地(1 a, 3 a,共22个样品)、旱地(1 a, 4 a,共9个样品)。

土壤样品经风干,磨碎,过筛,测定pH、阳离子交换量(CEC)、有机质(OM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、速效氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)、电导率(EC)、容重(BD)、土壤颗粒组成(后面的评价中以粉粒与黏粒含量比值即 Silt/Clay 来表示以衡量土壤质地状况),分析方法参照文献[32]。本研究以以上12

种土壤理化性质作为土壤最小数据集的候选因子集。理想情况下,一个好的土壤质量评价数据集还应包括土壤生物学性质<sup>[5]</sup>,但是这些理化性质基本上已经代表了土壤质量评价因子<sup>[9]</sup>,而且用生化指标作为土壤质量评价因子的最大问题是缺乏相关的参考值及这些生化性质之间存在的相互矛盾<sup>[5]</sup>。

自从以数理统计的方法来评价土壤质量的观点提出后<sup>[5]</sup>,近年来 Andrews 等<sup>[14]</sup>提出的以主成分分析(PCA)选择对样本总方差的解释力>5%的所有主成分,然后选择每个主成分中特征值最大那个变量进入最小数据集的方法得到广泛认可<sup>[7,12,33]</sup>。基于 Andrews 等的工作,本研究提出了一种多标准的土壤质量评价最小数据集因子选择方法: <sup>1</sup> 计算各土壤性质的主成分综合荷载; <sup>°</sup> 评价土地利用变化对土壤性质的影响程度得分; <sup>»</sup> 计算土地利用年限对土壤性质的影响程度得分。最后,通过变量分组、

对各变量的各项得分进行线性转化, 然后计算每个变量的分值总和并相互比较, 分值最高的将进入最小数据集。与先前工作相比的优势在于, 本研究考察的是对所有主成分的综合荷载, 而不是考虑对单个主成分的荷载; 在方法上除了 PCA 方法外, 还利用多元方差分析、多重比较及相关分析等进行最优变量的筛选; 最重要的是, 本研究将土地利用变化及利用年限这两个因素对土壤质量的影响进行定量化, 作为进入 MDS 的标准之一。

表 1 基于土地利用变化的土壤质量评价最小数据集确定的概念模型及计算

Table 1 Conceptual model for and computation of MDS of soil quality assessment based on land use change (LUC)

选择标准 Selectors	衡量方法 Scaling methods	衡量指标 Indicators	分值正态标准化 Score normalization
冗余数据的剔除	主成分分析及相关分析	相关组	根据分析结果进行分组
土壤属性重要性的确定	土壤属性在多维空间的相对重要程度	矢量值(Norm 值) 计算	分值线性标准化(越大的越好)
土地利用变化对土壤属性影响的程度	土地利用变化对土壤属性影响程度的定量	多元方差分析模型中的 $R^2$	
	对土壤属性产生显著影响的最早时间	时间 T	分值线性标准化(越小的越好)

(1) 候选因子的荷载以该变量在多维空间(由主成分组成的多维空间)上的综合荷载表达, 几何意义为该变量在多维空间上的矢量常模(Norm)的长度越长, 则表明该变量对所有主成分的综合荷载越大, 其解释综合信息的能力就越强。Norm 值的计算如下:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{l=1}^k (u_{ik}^2 K_l)}$$

式中,  $N_{ik}$  为第  $i$  个变量在特征值  $> 1$  的前  $k$  个主成分上的综合荷载;  $u_{ik}$  为第  $i$  个变量在第  $k$  个主成分上的荷载,  $K_k$  为第  $k$  个主成分的特征值。

(2) 土地利用变化对各土壤因子影响的大小由各种土地利用方式下土壤属性的多变量方差分析来确定。由此计算的决定系数 ( $R^2$ ) 被用来表示土地利用对土壤属性的影响大小。然后以水稻田作为土地利用的初始状态(即土地利用没有变化, 相当于土地利用转化为其他种植方式的年限为 0), 其余由其转化而来的利用方式的使用年限与之进行均值多重比较(S2N2K 比较法)。对每个候选因子而言, 最早产生显著影响的年限 T 作为土地利用时间对该土壤性质产生影响的界限。

(3) 共线性及冗余变量的剔除通过主成分分析及相关分析来解决。Spearman 相关系数可以最大程度降低数据的非正态分布或极值的存在等导致的分析结果不准确<sup>[33]</sup>。通过主成分分析结果, 结合相关系数将土壤变量分组。对于与其他变量相关性都很

## 2 最小数据集的建立

### 2.1 因子选择标准的建立

MDS 因子依据以下标准进行选择: ① 所有候选因子各自的综合荷载。② 各候选因子受土地利用变化及同种利用方式下种植年限长短的影响大小。③ 剔除共线性及冗余度高的因子。最小数据集因子选择标准的概念模型及计算过程如表 1。

低的极个别变量, 即使根据主成分分析应与某些变量划为一组的, 也将其提出来单独自成一组。

### 2.2 因子得分的线性转化及因子最终分值计算

为使因子得分具有可比性, 将因子得分正态化到 0 至 1 之间。由于目前土壤质量评价中没有关于 Norm 值、 $R^2$ 、T 值符合线性还是非线性的相关研究, 因此将这三者进行简单的线性变换<sup>[30]</sup>。其中 Norm 值越大说明该土壤因子在所有主成分中的荷载越大,  $R^2$  值越大则该因子受土地利用变化的影响越大。因此, 这二者中最大的分别赋值为 1, 其他变量的值除以相应的最大值即可。而 T 值越小说明该土壤变量在很短时间内就很容易的表现出土地利用变化带来的显著影响, 因此, T 值最小的赋值为 1, 以该最小 T 值除以各土壤变量的相应 T 值即可。最后对三者线性转换后的分值求和得到每个变量的总分值。然后每组分值最高的变量进入 MDS。

## 3 方法的应用与结果

### 3.1 土地利用对土壤性质的影响显著性分析

针对研究区分布最广的两种土壤类型黄泥土与黄松土, 利用多元方差分析模型研究了土壤类型差异对土壤性质的影响。从表 2 可知, 黄泥土与黄松土在稻田利用方式下大多数土壤性质有显著差异, 可见土壤类型的空间分布对土壤性质有很明显的影响。

表 2 黄泥土与黄松土在稻田利用方式下的土壤特性差异显著性分析<sup>1)</sup>

Table 2 Significance of difference in soil properties between the two soil types under rice cultivation

土壤类型 Soil type	n	BD (g cm <sup>-3</sup> )	pH	OM (g kg <sup>-1</sup> )	TN (g kg <sup>-1</sup> )	TP (g kg <sup>-1</sup> )	TK (g kg <sup>-1</sup> )	AN (mg kg <sup>-1</sup> )	AP (mg kg <sup>-1</sup> )	AK (mg kg <sup>-1</sup> )	CEC (cmol kg <sup>-1</sup> )	Silt/ Clay	EC (LS cm <sup>-1</sup> )
黄泥土 <sup>1</sup>	17	1106 (0102)	5148 (0107)	33126 (2153)	1195 (0113)	1102 (0129)	12173 (0133)	139174 (6185)	4179 (0189)	93131 (8180)	19170 (1108)	2174 (0104)	230138 (16100)
黄松土 <sup>0</sup>	48	1111 (0101)	5169 (0106)	39129 (1172)	2117 (0108)	0181 (0111)	15187 (0131)	133126 (5109)	2157 (0134)	110141 (14167)	20114 (0137)	2189 (0106)	320124 (42124)
Adj1 R <sup>2</sup>		01098	01035	01043	01023	- 01006	01313	- 01012	01090	- 01009	- 01014	01019	01010
p		01768	01007**	01000**	01000**	01329	01000**	01000**	01230	01113	01003**	01000**	01001**

1) \*\* 表示在  $p < 0.01$  水平上差异显著, Adj1 R<sup>2</sup> 为调整判定系数。括号中为标准误 \*\* means a significant difference at  $p < 0.01$  level Adj1 R<sup>2</sup> means the Adjust R<sup>2</sup> The data in bracket are the standard error (SE). <sup>1</sup> Clay loamy typic haplic stagnic anthrosol; <sup>0</sup> Fine sand clay loamy typic haplic stagnic anthrosol

基于表 2 的分析, 对研究区的黄泥土、黄松土、乌栅土、青紫泥、粉沙土、乌散土、白土(漂洗)、青泥土、乌泥土、粗骨土等 10 种土壤类型与稻田、荒地、菜地、林地、旱地等 5 种土地利用类型及其交互作用对土壤性质的影响进行显著性检验(见表 3), 发现不同的土壤性质侧重于受土壤类型或者土地利用方式影响, 尤其是速效养分受土地利用变化的影响非常显著, 只有全氮、全磷、质地未显著受二者的影响。由于土壤性质对不同土壤类型、不同土地利用方式

的响应程度不同, 在以土壤性质数据为数据源的土壤质量评价中应该考虑土壤类型及土地利用的影响。表 3 进一步证实了不同的土壤类型加上土地利用的作用会对土壤性质产生显著影响, 从而导致土壤质量发生变化, 进而用同一方法对不同的土壤类型计算所得到的 MDS 因子也可能会有所不同。因此, 本研究对黄泥土与黄松土分别进行分析选取最终评价因子数据集, 这样也便于将二者的最后结果进行比较, 验证该评价方法的可靠性、可重复性。

表 3 土壤类型与土地利用方式交互作用下的土壤性质差异显著性分析<sup>1)</sup>

Table 3 Significance of variation of soil properties of the soil under the interaction of soil type and land use type

土壤因子 Soil parameters	自由度 Degree of freedom	BD	pH	OM	TN	TP	TK	AN	AP	AK	CEC	Silt/ Clay	EC
土壤类型 Soil type	9	01000**	01585	01089	01247	01985	01000**	01143	01000**	01857	01003**	01172	01980
土地利用类型 Land use type	5	01007**	01179	01044**	01097	01222	01648	01000**	01000**	01000**	01522	01852	01009
交互作用 Interaction	14	01407	01003**	01769	01696	01931	01728	01006**	01000**	01212	01508	01946	01886
调整判定系数 Adj1 R <sup>2</sup>		01511	01417	01359	01343	01169	01468	01445	01549	01296	01259	01259	01209

1) \*\* 表示在  $p < 0.01$  水平上差异显著 \*\* means a significant difference at  $p < 0.01$  level

### 3.1.2 两种土壤类型上 MDS 的建立

通过主成分分析, 黄泥土类型上得到特征值  $> 1$  的主成分 5 个(共解释总方差的 79.199%), 黄松土类型上得到 4 个(能解释总方差的 73.107%)。两种土壤类型上各变量在前 3 个主成分空间上的双标图(Biplot 图)(图 3)显示了变量间的相互关系及主成分对各变量的解释程度。将每一主成分中荷载系数  $> 0.15$  的分为一组(表 4)。其中黄泥土类型根据主成分所分组与相关系数完全吻合(相关系数高的在同一组)。而黄松土类型上, 由于容重与其他变量的

相关系数均未达显著水平(见表 6 及表 7), 因此将其提出来单独作为一组。

两种土壤类型上各因子的分组及最终得分见表 4。最后得到黄泥土上的土壤质量评价 MDS 为 TN、pH、BD、TK、AK, 而黄松土上的 MDS 为 OM、pH、BD、TK、AP。其中黄泥土中 TN 可以用 OM 代替, 因为在黄泥土的分组 1 中, OM 与其他 4 个变量的相关系数都在 0.1679 以上, 明显高于 TN 与其他 4 个变量的相关系数(表 6), 而且 TN 的最终分值较 OM 仅高 0.1054(表 4), 因而尽管此处 TN 得分最高, 但完全可

以OM代之。结果表明, 两种类型上得到的MDS除了AK和AP不同外其余4个完全相同。

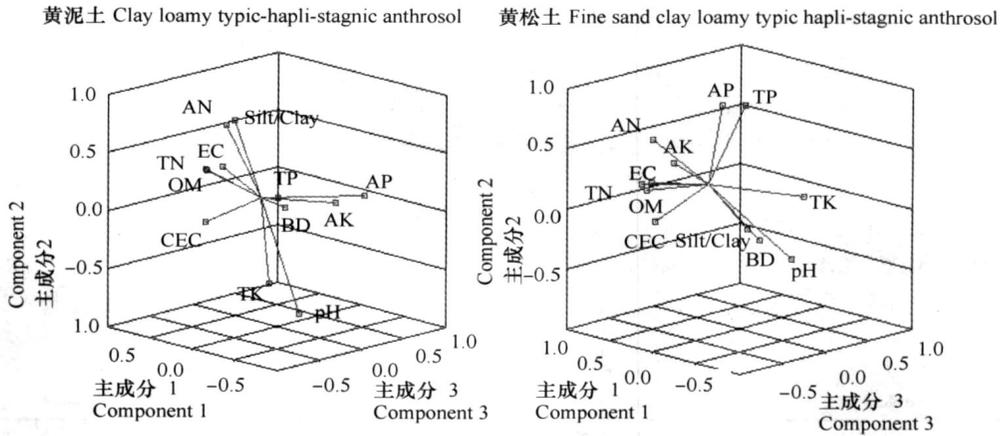


图3 基于主成分分析的各变量在前三个主成分上的矢量图

Fig 3 Biplot of each variable on the first 3 PCs based on PCA

表4 两种土壤类型上的各因子得分及土壤质量评价最小数据集确定

Table 4 Scoring of soil parameters and determination of MDS for soil quality assessment based on samples of the two different soil types

土壤因子 Soil parameters	分组 Grouping	评价模型 Model			线性变换 Linear transformation			求和 Sum
		Norm	R <sup>2</sup>	T	Norm	R <sup>2</sup>	T	
黄泥土 Clay loamy typic2hapli2stagnic anthrosol								
OM	1	11 764	01 863	1	01976	01869	1	21845
TN	1	11 808	01 893	1	1	01899	1	21899
AN	1	11 708	01 894	1	01945	01900	1	21845
CEC	1	11 523	01 967	1	01843	01974	1	21816
EC	1	11 412	01 894	1	01781	01900	1	21681
pH	2	11 329	01 993	1	01735	1	1	21735
Silt/ Clay	2	11 290	01 968	1	01713	01975	1	21688
AK	3	11 139	01 896	1	01630	01902	1	21532
AP	3	11 102	01 476	10	01609	01479	01 1	11189
TP	3	11 023	01 511	-	01566	01515	0	11080
TK	4	11 170	01 987	-	01647	01994	0	11641
BD	5	01 953	01 987	3	01527	01994	01 3	11854
黄松土 Fine sand clay loamy typic2hapli2stagnic anthrosol								
OM	1	11 918	01 921	2	01950	01926	1	21876
TN	1	11 838	01 943	2	01911	01948	1	21858
AN	1	11 503	01 903	4	01745	01908	01 5	
AK	1	11 789	01 626	-	01886	01629	0	11516
EC	1	21 018	01 566	-	1	01570	0	11570
AP	2	11 203	01 292	4	01596	01293	01 5	11390
TP	2	11 128	01 585	10	01559	01588	01 2	11347
TK	3	01 842	01 978	3	01417	01983	01 7	21067
CEC	3	01 994	01 985	10	01493	01990	01 2	11682
pH	4	11 054	01 993	2	01522	01998	1	21520
Silt/ clay	4	11 020	01 980	-	01506	01985	0	11491
BD	5	01 782	01 995	2	01387	1	1	21387

## 4 结果的检验

除了以上两种土壤类型的相互验证外,采用同样的方法,不分土壤类型对所有 194 个样品进行计算得到一个最小数据集,以便进一步对结果进行检验。按照主成分中荷载系数 > 0.15 的分为一组,结果得到与前面完全相同的 MDS(表 5)(只是在黄松土样品上得到的 MDS 包含 AP,稍有不同)。尽管黄泥土与黄松土在土壤性质上表现出显著差异,但由

二者及所有样品的数据用同样的方法分别计算都得到了同样的 MDS。该 MDS 中的土壤变量最大程度的代表了土地利用影响下土壤质量状况。其中,OM 解释了土地利用变化影响总变异的 86.13%~92.11%(见表 4,  $R^2$ ), pH 能解释 99.13%, TK 能解释 98% 左右, BD 能解释 99% 左右, AK 能解释 62.16%~89.16%, 而 AP 能解释 29.12%~46.17%。

为了说明 MDS 中的因子能够很好地代替其他未入选因子的信息,特对二者进行相关分析(表 6)。表 6 中所示的 MDS 因子与其他未入选因子间的相

表 5 基于所有样品的因子得分及最小数据集的确定

Table 5 Scoring of soil parameters and determination of MDS for soil quality assessment based on all samples

土壤因子 Soil parameters	分组 Grouping	评价模型 Model			线性变换 Linear transformation			求和 Sum
		Norm	$R^2$	T	Norm	$R^2$	T	
OM	1	11.081	0.916	1	1	0.923	1	21923
TN	1	11.786	0.937	1	0.992	0.945	1	21936
AN	1	11.485	0.907	1	0.825	0.914	1	21739
CEC	1	11.510	0.980	1	0.839	0.988	1	21826
EC	1	11.337	0.580	1	0.742	0.585	1	21327
pH	2	11.089	0.992	1	0.605	1	1	21605
Silt/Clay	2	11.027	0.975	1	0.570	0.983	1	21553
AK	3	11.247	0.769	3	0.692	0.775	0.3	11801
AP	3	11.101	0.335	10	0.612	0.338	0.1	11049
TP	3	0.935	0.646	2	0.519	0.651	0.5	11670
TK	4	0.906	0.979	1	0.503	0.987	0.3	11824
BD	5	0.857	0.992	2	0.476	1	0.5	11976

表 6 最小数据集因子与其他土壤性质之间的 Pearson 相关系数<sup>1)</sup>

Table 6 Pearson coefficient correlation between soil parameters inside and outside the MDS

	Silt/Clay	TP	TN	EC	AN	CEC
黄泥土与黄松土 <sup>1)</sup>						
OM	0.373**	0.1173*	0.845**	0.741**	0.679**	0.509**
pH	-0.516**	-0.1274**	-0.460**	-0.303**	-0.677**	-0.245**
BD	-0.010 ns	-0.1104 ns	-0.116 ns	-0.078 ns	-0.201*	-0.120 ns
TK	0.139 ns	0.1110 ns	0.162 ns	0.049 ns	-0.028 ns	0.137 ns
AK	0.015 ns	0.1125 ns	0.429**	0.712**	0.482**	0.152 ns
AP	-0.057 ns	0.1546**	0.156 ns	0.111 ns	0.479**	0.065 ns
所有样品 All samples						
OM	0.289**	0.1165**	0.840**	0.576**	0.641**	0.470**
pH	-0.531**	0.1221**	-0.394**	-0.229**	-0.558**	-0.166**
BD	-0.034 ns	-0.1075 ns	-0.087 ns	-0.135 ns	-0.105 ns	-0.010 ns
TK	0.191*	0.1080 ns	0.115 ns	0.052 ns	-0.027 ns	0.003 ns
AK	-0.014 ns	0.1194**	0.357**	0.489**	0.488**	0.125 ns
AP	-0.043 ns	0.1559**	0.167	0.129 ns	0.531**	0.059 ns

1) ns 表示在 0.05 的水平上不显著相关, \* 表示显著相关( $p < 0.05$ ), \*\* 表示极显著相关( $p < 0.01$ )。下同 ns means correlation non-significant at  $p < 0.05$  level; \* means highly correlation at  $p < 0.05$  level; \*\* means highly correlation at  $p < 0.01$  level. The same as below. <sup>1)</sup> Clay loamy typic2 haplic stagnic anthrosol and fine sand clay bany typic2 haplic stagnic anthrosol

关分析表明,除了 BD、AK 与其他因子完全不相关外,其他都达到极显著( $p < 0.01$ )或显著相关( $p < 0.05$ )。这说明 MDS 中的因子在一定程度上能很好地代替未入选因子解释土壤质量信息。

此外,为了检验 MDS 中的土壤变量间数据冗余程度是否降至最低,对入选 MDS 的各因子进行 Pearson 相关分析,见表 7,在 0.05 的检验水平上几乎是不相关的。因而,本 MDS 各因子间可以视为相互独立。

表 7 最小数据集因子之间的 Pearson 相关系数

Table 7 Correlation coefficient between factors of the MDS

所有样品 All samples	OM	pH	BD	TK	AK	AP	黄泥土与黄松土
OM	1	- 0.1400**	- 0.1159 ns	0.1191 ns	0.1489**	0.1115 ns	OM
pH	- 0.1363**	1	0.1205 ns	0.1109 ns	- 0.1186 ns	- 0.1306**	pH
BD	- 0.1138 ns	0.1151	1	0.1023 ns	- 0.1023 ns	- 0.1171 ns	BD
TK	0.1147 ns	0.1069 ns	- 0.1084 ns	1	0.1093 ns	0.1043 ns	TK
AK	0.1412**	- 0.1168 ns	0.1022 ns	0.1078 ns	1	0.1303**	AK
AP	0.1125 ns	0.1197 ns	- 0.1020 ns	- 0.1051 ns	0.1439**	1	AP

## 5 结论与讨论

利用多元方差分析、主成分分析等统计方法定量评价了土地利用方式及种植年限对各土壤因子的影响程度,然后依据一定的标准进行分组并最终确定了研究区的土壤质量评价 MDS,包括有机质、pH、容重、全钾、速效钾、速效磷,最后对该 MDS 的合理性、可靠性、可重复性进行了验证。该方法是以某一相对位置为参考点的,本研究中以水稻田为初始对象,假设所有其他利用方式均完全由水田利用方式转化而来;各利用方式的利用年限也是从水田利用方式变化到相应的利用方式开始算起。此外,在各因子得分的线性变换上,将最大的 Norm 值、 $R^2$  值及最小的 T 值分别赋其相对值为 1,其余值与其相比较,从而使因子得分分布在 0 至 1 的范围内。事实上,也有研究利用非线性分值转换方法<sup>[14,29,34]</sup>,但目前由于 Norm 值、 $R^2$  值及 T 值究竟更适合线性还是非线性转换无从考证,因而采用了相对简单的线性转换将 Norm 值、 $R^2$  值及 T 值调整到 0 和 1 之间。

在统计方法上,尽管 PCA 及多元统计在世界上已广泛应用于土壤质量评价工作中<sup>[8,14,33]</sup>,但都是用某变量在一个主成分上的荷载作为选择其进入 MDS 的依据,而同组中其余变量均被剔除,这样导致某些因子的信息就无法进入 MDS。而本文用变量在所有主成分上的综合荷载,即常模(Norm 值)来衡量每个变量的重要性就最大程度地避免了上述缺陷。

在利用所有样品进行验证时得到了与分别用黄

泥土和黄松土评价相同的结果(表 5)。三者结果的一致性说明该 MDS 确定方法具有稳定性、可重复性的特点。此外,既然能在不同的土壤类型上得到相同的 MDS,这在一定程度上说明有可能推广到其他地区的其他土壤类型上,当然这需要更加深入的工作来加以证明。

随着土地利用现状的变化,即使对同一研究区也可能会得到不同的 MDS。而且研究尺度、土壤性质空间变异性的不同也可能会导致产生不同的结果<sup>[8,10]</sup>,由于空间尺度、土壤空间变异性等对土壤质量评价最小数据集因子选择的影响目前还在摸索之中,故而本研究未加考虑,这也是本研究所建立的土壤质量评价 MDS 确定方法的缺陷之一。此外,采样点数量也是空间尺度中应考虑的问题,本研究对黄泥土和黄松土进行统计的样品数分别为 54 个及 77 个,而对所有 194 个样品进行统计也得到了同样的最小数据集。不同的样品数量在该方法下得到了同样的结果,这一方面验证了该方法的可靠性及可重复性,同时也说明,在本研究区尺度上,究竟何种密集程度的采样能够满足该方法的应用,这是土壤质量评价研究领域所面临的一个新课题,还有待更加深入的研究。

## 参考文献

- [1] Douglas L K, Craig A D, Susan S Al Soil quality: Why and how? *Geoderma*, 2003, 114: 145~156
- [2] Zhang B, Zhang Y, Chen D, et al A quantitative evaluation system of soil productivity for intensive agriculture in China *Geoderma*, 2004, 123: 319~331
- [3] Corwin D L, Lesch S M I Characterizing soil spatial variability with

- apparent soil electrical conductivity II Survey protocolsl Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46: 103~ 133
- [ 4 ] Shukla M K, Lal R, Ebinger Ml Determining soil quality indicators by factor analysisl Soil & Tillage Research, 2006, 87: 194~ 204
- [ 5 ] Gil-Sotres F, Trasa-Cepeda C, Leiros M C, et al Different approaches to evaluating soil quality using biochemical propertiesl Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37: 877~ 887
- [ 6 ] Breure A M, Mulder C, Rombke J, et al Ecological classification and assessment concepts in soil protectionl Ecotoxicology and Environmental Safety, 2005, 62: 211~ 229
- [ 7 ] Nortcliff S l Standardisation of soil quality attributesl Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002, 88: 161~ 168
- [ 8 ] Wang Z, Chang A C, Wu L, et al Assessing the soil quality of long-term reclaimed wastewater-irrigated croplandl Geoderma, 2003, 114: 261~ 278
- [ 9 ] Doran J W, Parkin T B l Quantitative indicators of soil quality: A minimum data setl Methods for Assessing Soil Qualityl Soil Science Society of America Special Publication Vol 49l SSSA, Madison, Wisconsin, USA, 1996l 25~ 37
- [ 10 ] Hoosbeek M R, Bouma J l Obtaining soil and land quality indicators using research chains and geostatistical methodsl Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 50: 35~ 50
- [ 11 ] 张华, 张甘霖, 漆智平, 等 l 热带地区农场尺度土壤质量现状的系统评价 l 土壤学报, 2003, 40(2): 186~ 193l Zhang H, Zhang G L, Qi Z P, et al Systematic assessment of soil quality at farm level in tropical area of China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 186~ 193
- [ 12 ] Barrios E, Delle R J, Bekunda M, et al Indicators of soil quality: A South-South development of a methodological guide for linking local and technical knowledge l Geoderma, 2006, 135: 248~ 259
- [ 13 ] Osbahr H, Allan C l Indigenous knowledge of soil fertility management in southwest Nigerl Geoderma, 2003, 111: 457~ 479
- [ 14 ] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P l A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002, 90: 25~ 45
- [ 15 ] Velasquez E, Lavelle P, Barrios E, et al Evaluating soil quality in tropical agroecosystems of Colombia using NIRSl Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37: 889~ 898
- [ 16 ] Sanchez P A, Palm C A, Buol S W l Fertility capability soil classification: A tool to help assess soil quality in the tropicsl Geoderma, 2003, 114: 157~ 185
- [ 17 ] Nizeyimana E L, Petersen G W, Imhoff M L, et al Assessing the impact of land conversion to urban use on soils with different productivity levels in the USA l Soil Science Society of America Journal, 2001, 65: 391~ 402
- [ 18 ] 胡月明, 万洪富, 吴志峰, 等 l 基于 GIS 的土壤质量模糊变权评价 l 土壤学报, 2001, 38(3): 266~ 274l Hu Y M, Wan H F, Wu Z F, et al GIS-based soil quality evaluation with fuzzy variable weight (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(3): 266~ 274
- [ 19 ] 王建国, 杨林章, 单艳红, 等 l 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究 l 土壤学报, 2001, 38(2): 176~ 183l Wang J G, Yang L Z, Shan Y H, et al Application of fuzzy mathematics to soil quality evaluation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(2): 176~ 183
- [ 20 ] 张庆利, 史学正, 潘贤章, 等 l 江苏省金坛市土壤肥力的时空变化特征 l 土壤学报, 2004, 41(2): 315~ 319l Zhang Q L, Shi X Z, Pan X Z, et al Characteristics of spatiotemporal changes of soil fertility in Jintan County, Jiangsu Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 315~ 319
- [ 21 ] 李新举, 胡振琪, 刘宁, 等 l 基于 3S 技术的黄河三角洲土壤质量自动化评价方法研究 l 农业工程学报, 2005, 21(10): 59~ 63l Li X J, Hu Z Q, Lin N, et al Research of soil quality based on 3S in the Yellow River delta (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 59~ 63
- [ 22 ] 王效举, 龚子同 l 红壤丘陵小区域不同利用方式下土壤变化的评价和预测 l 土壤学报, 1998, 35(1): 135~ 139l Wang X J, Gong Z T l Assessment and prediction of soil changes under different land use patterns at a small area level in red soil hilly region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(1): 135~ 139
- [ 23 ] 王华, 黄宇, 阳柏苏, 等 l 中亚热带红壤地区稻-稻-草轮作系统稻田土壤质量评价 l 生态学报, 2005, 25(12): 3271~ 3281l Wang H, Huang Y, Yang B S, et al Paddy soil quality assessment under rice-ryegrass rotation system in red soil region of mid-subtropics (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3271~ 3281
- [ 24 ] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等 l 土壤质量与土壤质量指标及其评价 l 生态学报, 2006, 26(3): 901~ 913l Liu Z F, Fu B J, Liu G H, et al Soil quality: Concept, indicators and its assessment (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 901~ 913
- [ 25 ] Lemeh M, Karlun E, Olsson M l Assessing soil chemical and physical property responses to deforestation and subsequent cultivation in smallholders farming system in Ethiopia l Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 105: 373~ 386
- [ 26 ] Giertz S, Junge B, Dieckkruger B l Assessing the effects of land use change on soil physical properties and hydrological processes in the subhumid tropical environment of West Africa l Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30: 485~ 496
- [ 27 ] Priess J A, de Koning G H J, Veldkamp A l Assessment of interactions between land use change and carbon and nutrient in Ecuador l Agriculture, Ecosystems and Environment, 2001, 85: 269~ 279
- [ 28 ] Lin X G, Yin R, Zhang H Y, et al Changes of soil microbiological properties caused by land use changing from rice-wheat rotation to vegetable cultivation l Environmental Geochemistry and Health, 2004, 26: 119~ 128
- [ 29 ] Glover J D, Reganold J P, Andrews S S l Systematic method for rating soil quality of conventional, organic and integrated apple orchards in Washington State l Agriculture, Ecosystems and Environment, 2000, 80: 29~ 45
- [ 30 ] Liebig M A, Varvel G, Doran J l A simple performance-based index for assessing multiple agroecosystem functions l Agronomy Journal, 2001, 93: 313~ 318
- [ 31 ] Niemeijer D, Mazzucato V l Moving beyond indigenous soil taxonomies: Local theories of soils for sustainable developmentl Geoderma, 2003, 111: 403~ 424

- [32] 鲁如坤1 土壤农业化学分析方法1 北京: 中国农业科技出版社, 2001 Lu R K, Analytical Methods for Soil and Agricultural Chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [33] Yemefack M, Jetten V G, Rossiter D G1 Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems Soil & Tillage Research, 2006, 86: 84~ 98
- [34] Hussain I, Olson K R, Wander M M, et al1 Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois Soil & Tillage Research, 1999, 50: 237~ 249

## ESTABLISHMENT OF A MINIMUM DATASET FOR SOIL QUALITY ASSESSMENT BASED ON LAND USE CHANGE

Li Guilin<sup>1,2</sup> Chen Jie<sup>1</sup> Tan Manzhi<sup>1</sup> Sun Zhiying<sup>1,2</sup>

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

(2 Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Science, Xiamen, Fujian 361003, China)

**Abstract** Based on 194 soil samples collected from the studied zone in the suburbs of Suzhou, a minimum dataset (MDS) for soil quality assessment was defined and developed with the aid of multivariate statistical techniques, such as multivariate analysis, principal component analysis and correlation analysis. Different from related previous work, the study took into account effects of the pattern and duration of land use on soil quality as an index of MDS, and worked out integrated load of each candidate soil physicochemical variable on all principal components with eigenvalue > 1 rather than just compare the load of a variable on a principal component and then rule out the others, thus avoiding losing too much soil quality information. Finally, reliability of the method was validated from different angles by applying the method to 54 Huangnitou samples, 77 Huangsongtu samples and all the 194 samples. The same MDS produced suggests that the method is very good in stability and reproducibility. Once the method is improved, it could be extrapolated to other soil types in other areas of China, so as to overcome the shortcoming of uncomparability of the results of soil quality assessment using different methods because the soils vary so much in geographic distribution and natural conditions.

**Key words** Soil quality assessment; Minimum dataset (MDS); Land use change (LUC); Multivariate statistics; Suzhou