

基于土壤特征和土地利用变化的 土壤质量评价最小数据集确定

李桂林^{1,2}, 陈 杰^{1,*}, 孙志英^{1,2}, 檀满枝¹

(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. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 进行土壤质量评价前, 必须先从大量土壤理化、生物学参数中严格选取对土壤质量敏感的评价参数最小数据集 (MDS)。考虑到目前经济转型期我国剧烈的土地利用变化对各种土壤过程的深刻影响, 通过以下 3 步选取土壤质量评价 MDS: 通过主成分分析 (PCA) 计算各土壤参数在所有特征值 ≥ 1 的主成分上的综合荷载; 通过多变量方差分析定量了土地利用变化对各土壤参数的贡献; 通过均值多重比较确定了土地利用年限对土壤性质的定量影响。最后经过线性变换、分组、相关分析检验等过程, 得到一个能最大限度的代表所有候选土壤参数而又尽可能少的损失这些候选参数所包含的土壤质量信息的最小数据集。该土壤质量评价 MDS 因子选取方法能很好地整合土地利用变化的综合定量影响, 同时具有很好的灵活性、可扩展性并能外推到其它地区。通过将该方法分别应用在 1985 年及 2004 年采样分析的两套数据各 12 个土壤候选参数集上, 得到了各包含 6 个因子的 MDS 及其在 20a 尺度上的变化规律, 发现 MDS 因子略有不同, 但变化不大。

关键词 土壤质量评价; 土地利用变化; 最小数据集; 时间尺度; 数理统计

文章编号: 1000-0933 (2007) 07-2715-10 中图分类号: S114 文献标识码: A

Establishing a minimum dataset for soil quality assessment based on soil properties and land use change

LI Gui-Lin^{1,2}, CHEN Jie^{1,*}, SUN Zhi-Ying^{1,2}, TAN Man-Zhi¹

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

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (7) 2715 ~ 2724.

Abstract : To assess soil quality, a Minimum Data Set (MDS) of soil properties has to be proposed commonly through calculating the total load of each candidate soil parameters on all of the qualified principal components by the use of Principal Component Analysis (PCA) and Norm-value computation. Considering intensive land-use change, the method introduced in this study for MDS establishment integrated the quantified contribution of landuse forms and duration to each soil parameter using multivariate analysis and mean multiple comparison. In this way, a MDS representing maximally all candidates with minimal loss of the soil quality information contained by those non-MDS soil parameters is established. The MDS proposed can not only well integrate the quantified influence of land-use change and duration on soil parameters, but also is quite flexible and extendable with the potential to be extrapolated to assess soil quality in other regions. Based on two sets of soil database obtained separately in 1985 and 2004, two MDSs established, were compared with each other. It was

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40571065)

收稿日期: 2006-11-13; 修订日期: 2007-05-18

作者简介: 李桂林 (1979 ~) 男, 湖北钟祥人, 博士生, 主要从事土壤资源利用管理及 GIS 应用研究. E-mail: glli@issas.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jchen@issas.ac.cn

Foundation item : The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40571065)

Received date 2006-11-13 ; **Accepted date** 2007-05-18

Biography LI Gui-Lin, Ph. D. candidate, mainly engaged in soil resource use and management and GIS. E-mail: glli@issas.ac.cn

found only a quite small change in MDS component occurred during a 20-year period. For a better assessment of soil quality ,it seemed necessary to examine at what temporal scale and how much the MDS will change for a site-specific area with intensive landuse change.

Key Words : soil quality assessment ; land use change ; minimum dataset ; temporal scale ; statistical technique

尽管土壤质量评价研究已在世界范围内广泛开展^[1-4],但过去 10a 内,只有不到 20% 的文献集中在土壤质量水平的估计及寻求科学合理的定量评价方法上^[4]。这在一定程度上反映了利用现有的科技手段评价土壤质量的难度,主要是土壤质量评价参数的种类、数量都难以选取^[5,6]。土壤质量评价中参数的选择非常重要,如果评价指标未经严格选择,评价结果将毫无意义^[5]。每个土壤理化、生物学属性都可能是最终评价因子,但对于特定区域,由于土壤利用方式的多变性、土壤性质的时空变异性、数据获取的成本高及因子间的共线性等因素,显然不可能获取所有因子的数据,而只能从候选参数数据集中选出一个能最大限度的代表所有候选参数的最小数据集(MDS)^[7]。

在过去几十年内提出的各种定量确定土壤质量 MDS 的方法中^[8-11],数理统计方法,尤其是主成分分析(PCA)应用最广泛^[4,8,12,13],因为 PCA 法能在一定程度上减少参评土壤性质的数量,同时也解决了数据冗余的问题^[6,8,11]。但是减少参评因子数量意味着这些因子所包含的土壤质量信息在一定程度上的丢失,因此目前基于 PCA 的评价很少能既最大限度的减少数据冗余,又能尽可能少的丢失参评土壤因子所包含的土壤质量信息。例如,Andrews 等选取每个主成分(PC)中因子荷载值在最高荷载值 10% 以内的所有因子进入 MDS^[8],这很容易就导致数据的冗余。而 Yemefack 等人则选取每个 PC 中综合得分最高的因子进入 MDS^[14],若该综合得分(是经过计算得到的一个分值,不是因子荷载)最高的因子与该 PC 中某评价参数的相关性很低,那么得分最高的因子显然不能覆盖该因子的信息,这样必然损失了部分土壤质量信息。

此外,目前建立土壤质量评价 MDS 很少考虑土地利用变化对土壤质量的影响。尽管土地利用方式及利用年限通过直接影响土壤的耕作、灌溉、田间管理措施等而对土壤理化、生物学性质及土壤结构等产生深刻影响早已是不争的事实^[15],但土地利用对土壤质量的综合影响却很难量化到土壤质量评价因子选取程序中。不同区域的土地利用现状很可能是不同的,因此,未考虑土地利用影响的土壤质量评价 MDS 很少能适用于其他地区,甚至对相邻的地区也不实用。

我国的土壤质量评价工作主要集中在评价方法的选择,如包括灰色系统理论^[16]、模糊数学^[17]、PCA^[18]、人工神经网络^[19]等在内数理统计方法及 GIS/RS 评价方法^[20,21],另外侧重于参评土壤参数的隶属度确定方法上^[21,22]。而应用这些方法评价之前,几乎均未进行 MDS 因子的定量选取。因此,尽管评价手段及隶属度的确定方法等方面都能与国际接轨,但由于应用这些评价方法前忽略了 MDS 参数的严格选取,导致我国的土壤质量评价结果在评价精度、可信度等方面都相对更加粗糙。而且,对于像中国这样的发展中国家而言,由于经济的转型、农业结构调整、土地利用变化剧烈,更应重视土壤质量评价因子选取中土地利用变化的深刻影响。

基于国内外土壤质量评价中 MDS 确定的研究现状,本文提出一种基于数理统计的 MDS 确定方法。该方法在一定程度上定量了土地利用变化及利用年限对土壤质量的综合影响,能最大限度覆盖所有候选土壤参数所表达的土壤质量信息,同时又尽可能降低数据冗余度。此外,通过将该方法对 1984 年及 2002 年两次采样获取的土壤数据分别应用,探索了土壤质量评价 MDS 因子在 20a 尺度上的变化规律。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

苏州市紧邻上海,位于长三角中心地区。本文研究区所指的苏州市不包括所辖常熟市等 5 个县级市,面积 1650km² (不计辖区内太湖水面)(图 1)。区内年均温度为 16℃、年均降雨量达 1100mm,河流湖泊等水域

面积占到总面积的 50% 以上。优越的农业气候条件及上千年的水稻种植使得当地土壤熟化程度高 ,为全国高肥力优质土壤区之一。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。

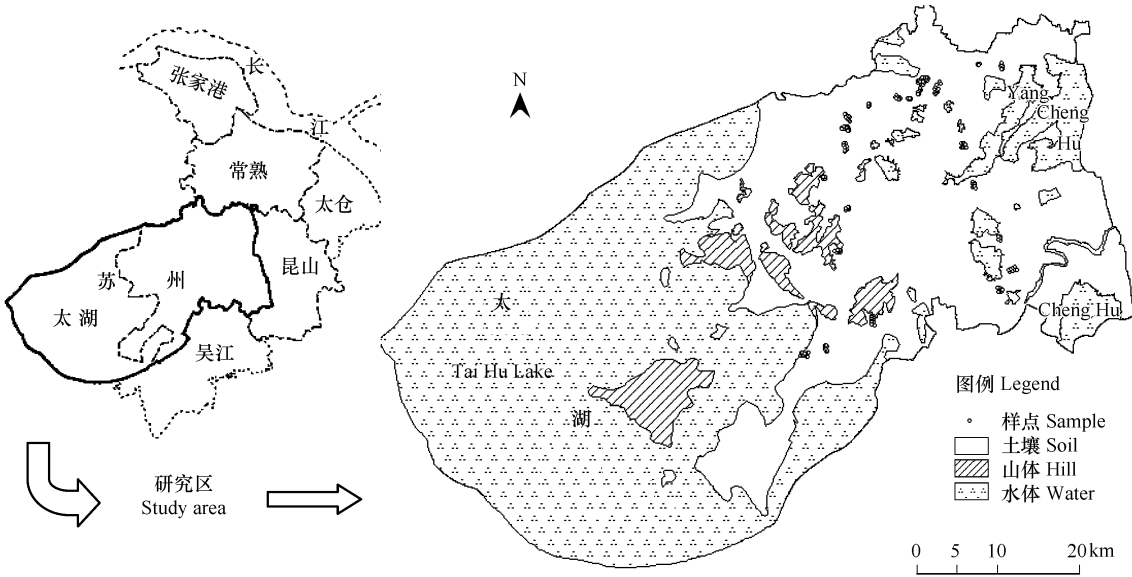


图1 研究区地理位置及 2004 年采样点分布
Fig. 1 Geographical location and sample distribution of study area

1.2 数据

MDS 的建立基于两套数据 :一是全国第二次土壤普查所得土壤图属性数据^[23] ,另一套 (Data2004)^①是于 2004 年 10 月底在苏州城市周边采集的 0 ~ 20cm 土壤表层的实验室分析数据 ,样点分布见图 1。采样过程中向当地农民详细调查每个采样点所在的土地利用方式及种植年限等相关数据。最后 ,共采到 6 种土地利用方式及各利用方式上不同种植年限的土壤样品供 201 个 ,去掉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 (1a ,3a ,5a ,共 52 个样品)、菜地 (2a ,5a ,10a ,共 15 个样品)、林地 (1a ,3a ,共 22 个样品)、旱地 (1a ,4a ,共 9 个样品)。土壤样品经风干 ,磨碎 ,过筛 ,参照《土壤农业化学分析方法》^[24]测定表 1 中的土壤理化参数用于 MDS 因子选取。其中 ,对 2004 年数据的评价以土壤粉粒与粘粒含量的比值 (粉/粘)来衡量土壤质地状况。由于数据的可获取性 ,1985 年候选参数数据集与 2004 年的稍有不同 (表 1)。理想情况下 ,土壤质量评价数据集还应包括土壤生物学参数^[4] ,但是理化参数基本上已经代表了土壤质量评价因子^[7] ,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^[4]。

表 1 1985 年及 2004 年分别参与土壤质量评价 MDS 确定的候选因子集
Table 1 Candidate soil parameters included in Data 1985 and Data 2004

数据 Data		候选土壤参数集 Candidate soil parameters	
Data 2004	pH ,CEC ,OM ,TN ,TP ,TK	粉粘比 Silt/Clay	电导率 EC
Data 1985	AN ,AP ,AK ,Bd	土壤厚度 Depth	总孔隙度 T_p

① 作者的实验室分析数据

1.3 方法

由于 1985 年刚改革开放不久,苏州市的城市化进程也刚刚起步,土地利用方式还相对单一,因此可以作为没有土地利用变化来处理。而到 2004 年,由于上海的经济辐射,苏州市已经成为中国城市化步伐最快的城市之一。受城市急剧扩张、农业结构调整等因素的影响,该区土地利用呈多样性、多变等特点,土地利用变化十分剧烈^[25]。因此,通过对分别从 Data1985 及 Data2004 得到的土壤质量评价 MDS 进行比较,可以发现不同时期的 MDS 参数集是否会随着土地利用变化而变化以及在多大的时间尺度(本研究参考尺度为 20a)上会变化。土地利用变化对 MDS 因子选取的影响及 MDS 因子随时间变化的研究框架见图 2。

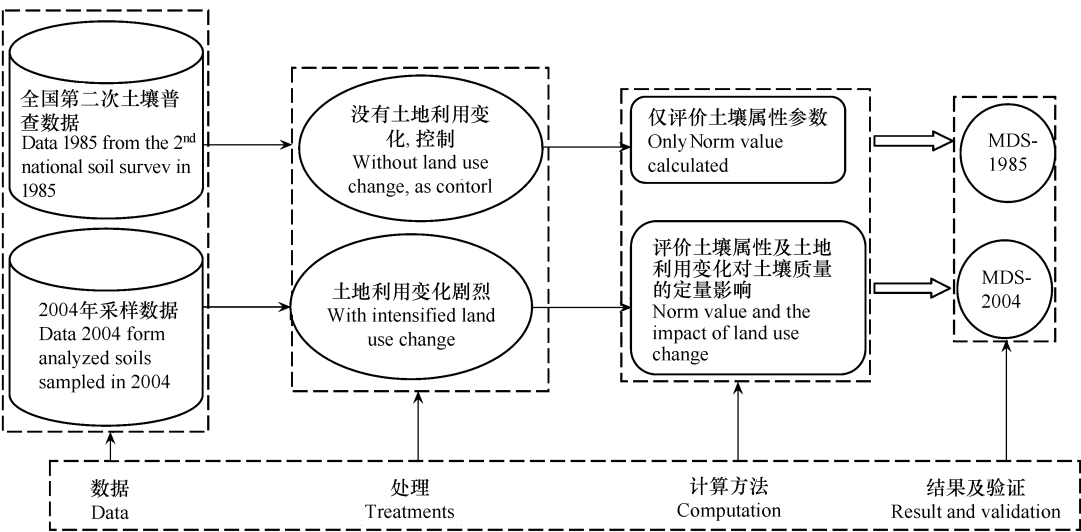


图 2 基于土壤理化参数及土地利用变化的土壤质量评价 MDS 确定思路
Fig. 2 Integrated method for soil quality assessment based on soil parameters and land use change

本研究克服了 Andrews 等人与 Yemefack 等人研究的缺点,最大程度地提取了候选因子集中各参数所包含的土壤质量信息,同时尽量降低了 MDS 的数据冗余程度。首先,通过 PCA 分析选取特征值≥1 的 PC^[3],每个选取 PC 中荷载≥0.5 的土壤参数被选出来作为一组,计算每个参数的综合得分,在每组内选出综合得分在最高分值 10% 范围内的所有参数,从而剔除那些信息量相对较少的参数;对每组内选出的参数进行相关分析,检查是否有明显的冗余问题存在。如果高度相关(相关系数≥0.5),则选取综合得分最高的参数进入最终的 MDS。对于不相关的参数,则全部进入 MDS。最后,对通过以上步骤最终确定的 MDS 参数进行相关分析,进一步检查数据冗余度问题。

2 MDS 的建立

(1) 计算 Norm 值 以前利用 PCA 选取 MDS 评价参数时,往往只考虑某变量在一个 PC 上的荷载,这样该变量在其他特征值≥1 的 PC 上的信息就全部丢失。而通过计算变量的 Norm 值能够完全避免此缺陷。Norm 值的几何意义为该变量在由主成分组成的多维空间中的矢量常模(Norm)的长度,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^[14]。Norm 值的计算如下:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_1^k (u_{ik}^2 \lambda_k)}$$

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

(2) 土地利用方式及年限对土壤性质影响的定量分析 对各种土地利用方式下土壤属性进行多变量方差分析,由此计算的决定系数(Adjust R^2)被用来作为土地利用对土壤属性的影响大小。统计学意义上,多变量方差分析中的 Adjust R^2 表示所得线性模型的决定系数,其值越大,说明自变量对因变量的解释力越强^[26],

在本研究中则体现为该土壤属性对土地利用变化的响应越强。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它种植方式的年限为 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 (LSD Test)。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)线性变换 为了消除 Norm 值、 R^2 及 T 值之间的量纲差异便于进行分值比较 ,将三者进行线性变换^[27] ,正态化到 0 至 1 之间。其中 Norm 值越大说明该土壤参数在所有选出的主成分中综合荷载越大 , R^2 值越大则该参数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 值越小说明该土壤参数在很短时间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 值除以各土壤参数的相应 T 值即可。最后对三者线性转换后的分值求和得到每个土壤属性的总分值。

(4)分组及分值排列 选出每个特征值 ≥ 1 的 PC 中因子荷载 ≥ 0.5 土壤参数分为 1 组。若某土壤参数同时在两个 PC 中的荷载高于 0.5 ,则该参数应归并到与其它参数相关性较低的那一组。分组后 ,考察每组中参数之间的相关性。如果某土壤参数与该组中其他参数的相关性都非常低 ($r < 0.3$) ,说明其他参数均不能代表该参数包含的土壤质量信息 ,故应将该参数从该组中分离出来独成一组。分组后 ,每组中总分值在最高总分值 10% 范围内的参数被选取 ,然后分析每组中所选参数间的相关性 ,若高度相关 ($r > 0.5$) ,则选取总分值最高的进入最终的 MDS。若相关性很低 ,则全部进入最终的 MDS。

(5)降低 MDS 的数据冗余度。第 (4)步已经通过相关分析降低了数据冗余度 ,但都是在各组内进行的。因此 ,最后应对来自不同组的进入 MDS 的因子进行相关分析 ,确定这些因子之间是否存在明显的数据冗余 ,从而得到最终的 MDS 土壤参数。

3 方法的应用及验证

3.1 方法的应用

在上述方法应用到 Data2004 前 ,首先通过方差分析 (ANOVA)对研究区近 10 种土壤类型与稻田、荒地、菜地、林地、旱地等 5 种土地利用方式对土壤性质的影响进行显著性检验 (表 2) ,发现不同的土壤性质侧重于受土壤类型或土地利用方式影响 ,尤其是速效养分受土地利用变化的影响极显著 ,只有全磷及质地未显著受二者的影响。因此 ,在研究区的土壤质量评价中考虑土地利用的影响是合理的。

表 2 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

Table 2 Significance of difference in effects of soil types and land-use change (LUC) and their interaction on soil parameters													
因子 Factors	df	Bd	pH	OM	TN	TP	TK	AN	AP	AK	CEC	Silt/Clay	EC
土壤类型 Soil types	9	0.000	0.585	0.089	0.247	0.985	0.000	0.143	0.000	0.857	0.003	0.172	0.980
土地利用变化 LUC	5	0.007	0.179	0.044	0.007	0.222	0.648	0.000	0.000	0.000	0.522	0.852	0.009
交互作用 Interaction	14	0.407	0.003	0.769	0.696	0.931	0.728	0.006	0.000	0.212	0.508	0.946	0.886
R^2		0.511	0.417	0.359	0.343	0.169	0.468	0.445	0.549	0.296	0.259	0.259	0.209

$N = 194$

通过 PCA 分析 ,先将参评的土壤参数初步分组并计算各自的 Norm 值 (表 3)。Data1985 中特征值 ≥ 1 的 PC 有 4 个 (能解释总变异的 91.46%) ,Data2004 中共 5 个 (能解释总变异的 74.05%)。其中 Data1985 的前 3 个 PC 能解释 12 个参评土壤参数总变异的 75.03% ,Data2004 的前 3 个则能解释 56.87% ,这说明两套数据的冗余程度都很高。两套数据中的参数在各自前 3 个 PC 空间上的 Biplot 图 (图 3)也直观地说明了各参数在多维空间上的高度相关性。例如 ,OM 与 TN、AN、CEC、EC 之间高度相关 (根据步骤 (4)以上 5 个参数划分为一组 ,组 1) ,pH 与粉/粘比划为组 2 ;AK、AP、TP 被划为组 3 ;而由于 TK 及 Bd (容重)与以上参数的相关性均分

别较低,故将这两个参数分别各划为一组。对 Data1985 进行同样的分析,最后也得到 5 组。Biplot 图中某参数矢量越长(即 Norm 值越大),说明该土壤参数在这 3 个 PC 中的综合荷载越大。

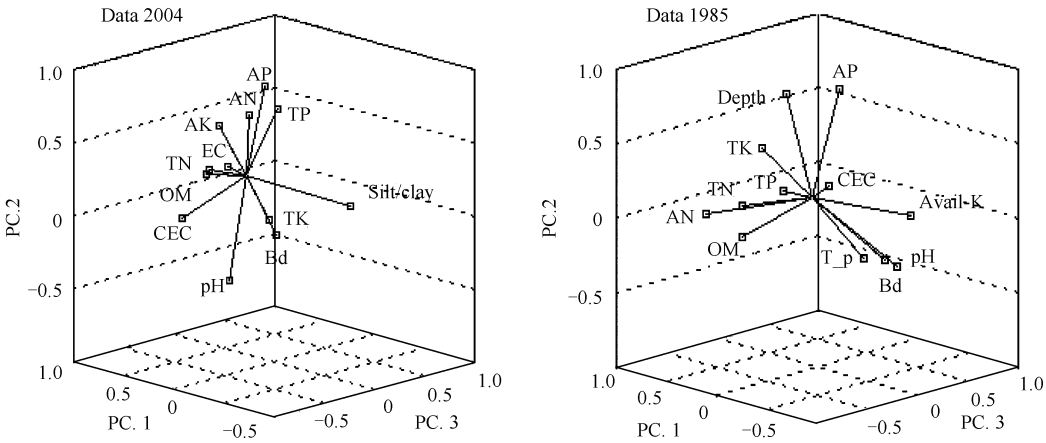


图3 Data1985 及 Data2004 中各参数在各自前 3 个 PC 空间上的综合荷载 Biplot 图

Fig. 3 Biplot of soil parameters on the first 3 PCs computed from PCA on the two set of data

然后通过 SPSS 中的 GLM 模块计算得 R^2 及多重比较得到 T 值,并将 Norm 值、 R^2 及 T 值进行线性转化、求和、分组,最后结果见表 3。在 1 组中,有 4 个土壤参数的综合分值和在最大值 (2.936) 的 10% 范围内,但由于 4 者之间高度相关 ($r \geq 0.5$, 表 4),而且 OM 与 CEC、有效氮的相关系数要明显高于全 N 与二者的相关系数,因此最后选取 OM 代替其他三者而未选取分值最高的全氮进入最终的 MDS。同理 2 组选择分值较高的 pH。3 组中,有效 K 与全 P 的相关系数仅 0.194 (< 0.50),故均进入 MDS。组 4 及组 5 中各有一个因子,全部进入 MDS。

表 3 基于 Data2004 的土壤参数得分计算及 MDS 评价因子选取

Table 3 Scoring candidate soil parameters and determining the MDS based on Data2004

土壤参数 Soil parameters	分组 Grouping	得分计算 Scoring			线性变换 Linear transform			和 Sum
		Norm	R^2	T	Norm	R^2	T	
TN	1	1.786	0.937	1	0.992	0.945	1	2.936
OM	1	1.801	0.916	1	1	0.923	1	2.923
CEC	1	1.510	0.980	1	0.839	0.988	1	2.826
AN	1	1.485	0.907	1	0.825	0.914	1	2.739
EC	1	1.337	0.580	1	0.742	0.585	1	2.327
pH	2	1.089	0.992	1	0.605	1	1	2.605
粉/粘比 (Silt/clay)	2	1.027	0.975	1	0.570	0.983	1	2.553
AK	3	1.247	0.769	3	0.692	0.775	0.333	1.801
TP	3	0.935	0.646	2	0.519	0.651	0.5	1.670
AP	3	1.101	0.335	10	0.612	0.338	0.1	1.049
Bd	4	0.857	0.992	2	0.476	1	0.5	1.976
TK	5	0.906	0.979	1	0.503	0.987	0.333	1.824

对于 Data1985,由于不考虑土地利用变化的影响,因此无需计算 R^2 及 T 值,只比较 Norm 值。由于无量纲影响,故线性转化也可省略。其余分析过程与 Data2004 相同,最后结果见表 5。由其得到的 MDS 与 MDS2004 略有不同,二者都含有 6 个参数,其中有 4 个 (OM, pH, 有效 K, 全 K) 相同,另外 MDS1985 中还包括有效 P、总孔隙度,而 MDS2004 中则包括全 P 及容重。

3.2 MDS 因子的可解释性

(1) OM 因其吸持、释放土壤养分及改良土壤结构等功能而对土壤质量起着至关重要的作用。在 2004

年 ,土壤 OM 比其他 MDS 因子表现出对土地利用变化更高的敏感性 (见表 3 中 R^2) ,而且与很多土壤参数都高度相关 (表 4) ,能在很大程度上覆盖其他因子多包含的土壤质量信息。当土壤利用方式从水稻田变为其他方式时 ,OM 含量显著下降^[28]。

表 4 MDS 参数与非 MDS 参数间的 Pearson 相关分析

Table 4 Pearson correlation coefficient between factors inside the MDS and those outside

项目 Item	Silt/clay	EC	AP	TN	AN	CEC			
Data 2004									
OM	0.289	0.576	0.125	0.840	0.641	0.470			
pH	-0.531	-0.229	-0.197	-0.394	-0.558	-0.166			
AK	-0.014 ns	0.489	0.539	0.357	0.488	0.125 ns			
TP	0.018ns	0.123ns	0.559	0.192	0.271	0.052ns			
TK	0.191	0.052 ns	-0.051	0.115 ns	-0.027 ns	0.003 ns			
Bd	-0.034 ns	-0.135 ns	-0.020ns	-0.087 ns	-0.105 ns	-0.010 ns			
Data 1985							TP	Depth	Bd
OM				0.906	0.859	0.629	0.151	-0.316	-0.617
pH				-0.335	-0.555	-0.140	0.362	-0.295	-0.259
AK				0.217	-0.110	0.581	-0.221	-0.350	-0.069ns
TK				0.387	0.393	0.173	0.295	0.396	-0.577
AP				-0.340	-0.342	-0.141	0.273	0.753	0.066ns
T_p				0.312	0.133	0.446	-0.098	-0.615	-0.440

ns 无显著差异 no significance

表 5 基于 Data1985 的 PCA 分析 ,Norm 值计算及最后 MDS 参数选取

Table 5 PCA analyzing , grouping and calculating of Norm values on the candidate variables for Data 1985

土壤参数 Soil parameters	分组 Grouping	主成分 1 PC 1	主成分 2 PC 2	主成分 3 PC 3	主成分 4 PC 4	Norm 值 Norm values
AN	1	0.964	-0.126	-0.137	-0.105	2.01
TN	1	0.933	-0.134	0.193	-0.001	1.95
OM	1	0.879	-0.320	0.128	0.069	1.88
Bd	1	-0.844	-0.090	-0.171	-0.159	1.77
CEC	1	0.545	-0.013	0.653	-0.097	1.46
pH	2	-0.488	-0.291	0.298	0.744	1.51
TK	2	0.548	0.367	-0.009	0.546	1.44
TP	2	0.132	0.194	-0.215	0.749	1.08
AP	3	-0.234	0.912	-0.023	0.118	1.46
Depth	3	-0.010	0.899	-0.320	0.050	1.42
T_p	4	0.213	-0.436	0.672	0.369	1.32
AK	4	-0.037	-0.142	0.884	-0.145	1.28

(2)pH 表征土壤反应状况并直接影响土壤养分的有效性。在研究区内 pH 对土地利用表现为中度敏感。在从水稻田转化为其他利用方式后的第 1 年后即表现出极显著差异 ($P < 0.01$) ,包括转化为菜地、旱地后的显著降低及转化为荒地、林地后的显著升高^[28]。在 20a 尺度上 ,pH 的显著降低 (降低率为 11.01% ,表 6)也是 pH 成为对该区土壤质量非常敏感的指标的原因之一。

表 6 过去 20a 苏州市土壤部分理化参数含量变化

Table 6 Dynamics of soil parameters in cantonal Suzhou over the last 20 years

年份 Year	pH	CEC (cmol kg^{-1})	OM (g kg^{-1})	全 N (g kg^{-1})	全 P (g kg^{-1})	全 K (g kg^{-1})	有效 P (mg kg^{-1})	有效 K (mg kg^{-1})	Bd (g cm^{-3})
1986	6.45	17.80	28.22	1.69	0.648	16.02	23.19	85.13	1.18
2004	5.74	19.90	32.83	1.87	0.77	14.65	27.71	107.06	1.16
变化率 Changing rate (%)	-11.01	11.80	16.34	10.39	18.83	-8.55	19.49	25.76	-0.02

3)有效态及全量的 K 和 P 作为作物生长所需的重要养分元素,在本研究中分别在不同时段被选进 MDS。在 MDS2004 中,有效态/全量的 K 及全量的 P 在从水稻田利用为其他方式的第 3 年开始表现出对土地利用变化的敏感性,而有效态 P 则在 10a 后才表现出对土地利用变化的响应,这在以往相关工作中也得到印证^[28, 29]。但是,与 OM 相比,这 4 个参数对土地利用变化的敏感性都较为逊色。一般来说,全 K、全 P 不应成为对土壤质量敏感的因子,但是太湖土壤 N 的明显盈余、P 相对 N 而言的亏缺及 K 的绝对亏缺^[30],可能是 P、K 成为该区土壤质量评价因子的原因之一。该区在过去 20a 内的部分土壤参数变化率见表 6。其中有效 K 含量增加率最高,但全 K 却仍呈下降趋势。土壤养分的严重不平衡使得 P、K 比 N 素对土壤质量更敏感。此外,全 K 被选入 MDS 也因其与其他因子的相关性很低而导致其他参数不能包含全 K 所代表的土壤质量信息。

(4)容重是衡量土壤空隙结构、土壤水分渗透性能及养分淋溶难易、土壤可蚀性等因素的重要指标。本研究中,容重在土地利用方式改变后的第 2 年表现出显著差异性。对有些利用方式则要 10a 后才表现出显著差异。此外,与其他参数相关性较低也是容重进入 MDS 的原因之一。

3.3 MDS 因子的进一步验证

除了 MDS 因子解释土壤质量的合理性外,通过 Pearson 相关系数分析对所得 MDS 进一步检查是否还存在明显的冗余(表 4)。对于 1985 年及 2004 年两套数据集而言,除去全 K 及容重是因为与其它参数的相关性都较低而被选入 MDS 外,各自的每个 MDS 参数至少与一个非 MDS 参数极显著相关($r \geq 0.5$)(表 4)。因此,MDS1985 及 MDS2004 中的参数都能代替各自未选入的参数并最大程度的表达土壤质量信息,其中 MDS2004 中的参数还包含土地利用变化及利用时间对土壤质量影响的信息。

4 结论及讨论

基于统计及其他计算,从 1985 年及 2004 年两个时期的各 12 个土壤参数中得到各包含 6 个参数的土壤质量评价 MDS。所得 MDS 中的参数都是在各自时期内对当地土壤质量最敏感的土壤性质,都是极其合理的、可解释的。此外还发现在 20a 尺度上,随着土地利用的变化 MDS 略有不同,但改变不大。

本文提出的土壤质量评价 MDS 确定方法可以非常灵活的运用,有很好的扩展性。该方法能够整合土地利用变化及土壤性质等因素,在没有土地利用数据的情况下也可以只利用土壤属性数据,例如可以只考察 R^2 及 Norm 值(如果没有土地利用种植时间数据),或者仅计算 Norm 值(完全没有土地利用数据的情况下)。不同区域的土地利用现状可能是不同的,但该方法并不受地域的限制,完全能够推广到不同的区域中去。该方法主要基于统计技术中的 PCA 分析及 GML 统计模块。Norm 值的引入并与 PCA 分析的结合较好的避免了由于只用某参数在一个 PC(特征值 ≥ 1)上的荷载作为选择其进入 MDS 的依据而导致该参数在其他 PC 上的信息被忽略的缺点。此外,本研究对因子得分采用线性变换,事实上,也有研究利用非线性分值转换方法^[31],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。最后在相关系数的控制下,该方法得到的 MDS 参数能够最大限度的包含所有未入选参数所表达的土壤质量信息,同时又将数据冗余程度降到最低。

在土壤质量评价中,无论土地利用方式变化多剧烈,有些对土壤质量起极其重要作用的参数(如本案例中的 OM 与 pH)总是会被选入 MDS。而在某些特定区域,那些对当地土壤性质产生“瓶颈”效应的参数可能代替某些对土壤质量影响较重的土壤参数(如土壤 OM 含量),甚至用非土壤参数作为衡量土壤质量的重要指标,如坦桑利亚北部的 P(其次是 N)被认为是该地区最主要的肥力评价参数^[32];沿海盐渍土地区的土壤盐渍度^[21]、甚至雨水的丰富程度而不是土壤本身属性作为最重要的评价指标^[10]。当然,如果 20a 的研究尺度不足以长到使得土地利用变化对许多土壤性质产生显著影响,这也可能会导致 MDS1985 与 MDS2004 中的参数基本相同。因此,由于土壤质量评价因子会随着土地利用变化、社会经济发展而变化,究竟会在多大程度上变化、会在多大的时间尺度上变化都还是未知的。本文未考虑 MDS 因子会在多大的空间尺度上变化,因为目前土壤性质空间变异性的研究还未有结果^[33],而且如何将土壤性质空间变异性考虑到土壤质量评价中去也

是一个很大的挑战 ,有待进一步研究。

References :

[1] Douglas L K , Craig A D , Susan S A. Soil quality : why and how ? *Geoderma* , 2003 , 114 : 145 — 156.

[2] Corwin D L , Lesch S M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity I . Survey protocols. *Computers and Electronics in Agriculture* , 2005 , 46 : 103 — 133.

[3] Shukla M K , Lal R , Ebinger M. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil & Tillage Research* , 2006 , 87 : 194 — 204.

[4] Gil-Sotres F , Trasar-Cepeda C , Leiros M C , *et al.* Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology & Biochemistry* , 2005 , 37 : 877 — 887.

[5] Nortcliff S. Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture , Ecosystems and Environment* , 2002 , 88 : 161 — 168.

[6] Wang Z , Chang A C , Wu L , *et al.* Assessing the soil quality of long-term reclaimed wastewater-irrigated cropland. *Geoderma* , 2003 , 114 : 261 — 278.

[7] Doran J W , Parkin T B. Quantitative indicators of soil quality : a minimum data set. *Methods for assessing soil quality*. Soil Science Society of America Special Publication. SSSA , Madison , Wisconsin , USA , 1996 , 49 : 25 — 37.

[8] Andrews S S , Karlen D L , Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture , Ecosystems & Environment* , 2002 , 90 : 25 — 45.

[9] Barrios E , Delve R J , Bekunda M , *et al.* Indicators of soil quality : A South South development of a methodological guide for linking local and technical knowledge : A South South development of a methodological guide for linking local and technical knowledge. *Geoderma* , 2006 , 135 : 248 — 259.

[10] Osbahr H , Allan C. Indigenous knowledge of soil fertility management in southwest Niger. *Geoderma* , 2003 , 111 : 457 — 479.

[11] Velasquez E , Lavelle P , Barrios E , *et al.* Evaluating soil quality in tropical agroecosystems of Colombia using NIRS. *Soil Biology and Biochemistry* , 2005 , 37 : 889 — 898.

[12] Rezaei S A , Gilkes R J , Andrews S S. A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. *Geoderma* , 2006 , 136 : 229 — 234.

[13] Govaerts B , Sayre K D , Deckers J. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil & Tillage Research* , 2006 , 87 : 163 — 174.

[14] Yemefack M , Jetten V G , Rossiter D G. Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems. *Soil & Tillage Research* , 2006 , 86 : 84 — 98.

[15] Liu Z F , Fu B J , Liu G H *et al.* Soil quality : concept , indicators and its assessment. *Acta Ecologica Sinica* , 2006 , 26 (3) : 901 — 913.

[16] Li Y F , Tang J , Lin N F , *et al.* Application of Grey System Theory in evaluating grassland soil quality. *Journal of Jilin Agriculture University* , 2003 , 25 (5) : 551 — 556.

[17] Hu Y M , Wan H F , Wu Z F , *et al.* GIS-based soil quality evaluation with fuzzy variable weight. *Acta Pedologica Sinica* , 2001 , 38 (3) : 266 — 274.

[18] Hou W G , Jiang C S , Xiong Q W , *et al.* Evaluation of soil quality based on GIS. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* , 2003 , 28 (1) : 60 — 64.

[19] Shen Z Q , Zhou B , Kong F S , *et al.* Study on spatial variety of soil properties by means of generalized regression neural network. *Acta Pedologica Sinica* , 2004 , 41 (3) : 471 — 475.

[20] Sun B , Zhou S L , Zhao Q G. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma* , 2003 , 115 : 85 — 99.

[21] 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.

[22] Zhang H T , Zhou Y , Wang S Q , *et al.* Natural productivity evaluation of cultivated land based on GIS and RS data in Houhu Farm of Jiangnan Plain. *Tansactions of the CSAE* , 2003 , 19 (2) : 219 — 223.

[23] Office for Jiangsu soil survey. *Soil species in Suzhou City*. Suzhou : Suzhou Soil Survey Office , 1985.

[24] Lu R K. *Soil analytical methods for and agricultural chemistry*. Beijing : China Agricultural Science and Technology Press , 2000.

[25] Li G L , Chen J. Landuse and pressure on soil resources in peri-urban areas. *Resources and Environment in Yantze Basin* , 2005 14 (5) : 579 — 583.

[26] Mi H , Zhang W Z , *Practical statistical analysis and SPSS application*. Beijing : China Contemporary Press , 2004. 133.

[27] Liebig M A , Varvel G , Doran J. A simple performance-based index for assessing multiple agroecosystem functions. *Agronomy Journal* , 2001 , 93 :

313—318.

[28] Zhou F , Chen J , Li G L , *et al.* Spatio-temporal variation of soil fertility in the peri-urban Suzhou. *Chinese Journal of Soil Science* ,2007 ,38 (1) : 6—10.

[29] Zhou Q X , Zhu Y M. Potential pollution and recommended critical levels of phosphorus in paddy soils of the southern Lake Tai area , China. *Geoderma* ,2003 ,115 :45—54.

[30] Gao C , Sun B , Zhang T L. Sustainable nutrient management in Chinese Agriculture : challenges and perspective. *Pedosphere* ,2006 ,16 (2) :253—263.

[31] Glover J D , Reganold J P , Andrews S S. Systematic method for rating soil quality of conventional , organic and integrated apple orchards in Washington State. *Agriculture , Ecosystems and Environment* ,2000 ,80 :29—45.

[32] Ndakidemi P A , Semoka J M R , Soil Fertility Survey in Western Usambara Northern Tanzania. *Pedosphere* ,2006 ,16 (2) :237—244.

[33] Hoosbeek , M R , Bouma J. Obtaining soil and land quality indicators using research chains and geostatistical methods. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* ,1998 ,50 :35—50.

参考文献：

[15] 刘占峰 ,傅伯杰 ,刘国华 ,等 ,土壤质量与土壤质量指标及其评价. *生态学报* 2006 ,26 (3) :901~913.

[16] 李月芬 ,汤洁 ,林年丰 ,等 ,灰色关联度法在草原土壤质量评价中的应用. *吉林农业大学学报* 2003 25 (5) :551~556.

[17] 胡月明 ,万洪富 ,吴志峰 ,等 ,基于 GIS 的土壤质量模糊变权评价. *土壤学报* 2001 38 (3) :266~274.

[18] 侯文广 ,江聪世 ,熊庆文 ,等 ,基于 GIS 的土壤质量评价研究. *武汉大学学报 (信息科学版)* 2003 28 (1) :60~64.

[19] 沈掌泉 ,周斌 ,孔繁胜 ,等 ,应用广义回归神经网络进行土壤空间变异研究. *土壤学报* 2004 41 (3) :471~475.

[22] 张海涛 ,周勇 ,汪善勤 ,等 ,利用 GIS 和 RS 资料及层次分析法综合评价江汉平原后湖地区耕地自然地力. *农业工程学报* 2003 19 (2) :219~223.

[23] 江苏省土壤普查办公室. 江苏省苏州市土壤志. 苏州市土壤普查办公室 ,1985.

[24] 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.

[25] 李桂林 ,陈杰. 城市边缘带土地利用特征与土壤资源压力. *长江流域与环境* 2005 ,14 (5) :579~583.

[26] 米红 ,张文璋. 实用现代统计分析方法与 SPSS 应用. 北京 :当代中国出版社 2004. 133.

[28] 周峰 ,陈杰 ,李桂林 ,等 苏州城市边缘带土壤综合肥力质量时空特征. *土壤通报* ,2007 ,38 (1) :6~10.