

土壤质量评价指标及其时空变异*

路 鹏¹ 苏以荣² 牛 铮¹ 吴金水²

(1. 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室 北京 100101;

2. 中国科学院亚热带农业生态研究所 长沙 410125)

摘 要 综述了土壤质量的概念及其研究进展,并探讨了土壤质量指标的选择原则,得出不同土壤的评价应以土壤的功能为基础并采用不同的标准。在以往研究中,人们一直强调以土壤物理、化学特性作为土壤质量指标。目前,国内外关于土壤生物学指标的研究日益增多,一些参数作为生物指标已表现出很大的潜力并成为系统稳定性的早期预警和敏感指标。之后阐述了国内外土壤质量指标空间变异的研究现状,探讨了该领域研究中存在的问题,展望了国内外土壤空间变异的研究前景。

关键词 土壤质量 评价指标 时空变异 生物指标

Soil quality assessment indicators and their spatial-temporal variability. LU Peng¹, SU Yi-Rong², NIU Zheng¹, WU Jin-Shui² (1. The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China), *CJEA*, 2007, 15(4): 190~194

Abstract The concept of soil quality was reviewed and the method of selecting soil quality assessment indicators discussed. Soil quality assessment is based on soil function with different criteria in accordance with soil types. Major emphasis is on the use of soil chemical and physical properties as indicators of soil quality. At present, investigations on soil biological parameters are only gaining grounds. Soil bio-indicators are showing great potential to become early warning and sensitive indicators of soil stress or perturbation. Research 'protocol' of spatial variability in soil quality is presented and exiting problems discussed. Finally, future research direction on soil quality spatial variability at home and abroad is forecasted.

Key words Soil quality, Assessment indicators, Spatial-temporal variability, Bio-indicator

(Received June 11, 2006; revised Sept. 18, 2006)

土壤是人类赖以生存和发展的物质基础。随着人类社会经济的高速发展,土地资源的过度开发利用导致了土壤资源退化,使人口-资源-环境间的矛盾日益尖锐,并对农业可持续发展造成严重威胁。因此,土壤资源作为一种脆弱性的非再生资源^[1],质量问题正在不断得到世界范围内各方面人士的广泛关注。为了保障我国 21 世纪粮食安全,必须保持和提高土壤质量,重新认识土壤管理与环境间的相互关系和土壤在环境中的重要意义。

土壤质量可以通过土壤质量指标来推测。土壤质量指标具有复杂的时间和空间变异性,包含了众多在时间空间上存在显著变异的化学、物理和生物指标,这些指标在土壤质量中的重要程度和相互作用机理仍然没有得到充分认识^[2]。Hoosbeek 和 Bryant^[11]认为土壤质量具有时空分异特征,必须比较或分析两个或多个时相变化才能更好地了解土壤质量变化的本质和机理。然而,土壤质量评价也必须确定评价的空间范围,可以是地块、景观单元、区域乃至整个国家。Pennock 等^[12]根据分散的采样数据在景观和地区尺度上评价了 3 个草甸农业系统的土壤质量。Smith 等^[13]利用 Kriging 方法得到了景观尺度上的土壤质量图。

依据地统计方法研究土壤的空间变异,结合预测模型建立不同于传统土壤图概念的连续分布土壤图也是新近的研究方向,存在的问题是这种方法往往是特定区域的研究,还缺乏成熟的可转移技术模式。因此,可以说土壤空间关系、土壤质量指标的时空变异和制图研究将迎来新的突破。

1 土壤质量概念及评价指标选定原则

20 世纪 80 年代,西方发达国家将全球粮食单产下降归结为环境质量的下降,特别是土壤质量的下降,

* 国家自然科学基金项目(40571117)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-426, KZCX2-YW-313)资助

收稿日期:2006-06-11 改回日期:2006-09-18

提出了土壤质量的概念^[3,14]。随着时代的发展和科学技术水平的提高,土壤质量的概念不断发展变化。自20世纪90年代初明确提出土壤质量的概念后,国内外关于土壤质量出现了各种不同的看法^[15,16]。目前国际上比较通用的土壤质量的概念是:在生态系统边界内保持作物生产力、维持环境质量、促进动植物健康的能力^[17]。即土壤质量是指土壤肥力质量、土壤环境质量及土壤健康质量3方面的综合量度。

评价指标的选定是土壤质量评价的核心工作,直接关系到其评价结果的客观性。首先,应尽量选择可靠、可度量 and 可重复的指标。其次,作为土壤质量评价的指标,应以土壤养分为主,能较显著影响土壤生产力。最后,应针对评价的区域与尺度来选择参评指标。不同的区域、不同景观类型的土地,应使用不同的指标体系,且选择指标的侧重点也应不同,应考虑此区域的气候和地形等地理状况。不同尺度下评价指标的选定也应不同,大尺度的评价指标是对小尺度评价指标的扩展或联合。因此,需要根据评价目的和目标区的环境条件,选择评价土壤质量的化学、物理学和生物学土壤质量指标。Powers等^[18]指出一些在农业上频频使用的指标在林业上却很少有用,这也说明评价的目的和对象不同,选用的评价指标也不同。出于实际应用的目的,一般只选择那些易度量、重现性好的指标。

2 土壤质量的评价指标

土壤质量是土壤多种功能的综合体现,对土壤质量的评价必需建立在对土壤实现其功能的能力评价基础上,并根据土壤的物理质量、化学质量和生物学质量指标进行测定和评价。因而,选择合适的土壤质量指标是评价土壤质量的基础和关键。

关于土壤质量的文献多次强调建立包含不同土壤功能指标的必要性,然而,到目前为止,明确规定的土壤质量指标所含的范围非常狭窄,多数着重于与植物生长和作物产量有关的土壤因子。如Larson和Pierce^[19]建议采用土壤参数的最小数据集来评价土壤质量,其中的各个参数必须能在短时间测定并且是对土地利用和管理决策有用的,参数的选择基于其易测定性、重现性,以及代表控制土壤质量关键变量的能力。Doran等^[17]提出了一个基本土壤性质集,满足大多数农业条件下显示土壤质量状况的需要,包括土壤物理指标(质地、土壤深度、表土和根层深度、容重和渗透性、土壤持水性)、土壤化学指标(土壤有机质、pH、电导率、可释放N、P、K)、土壤生物指标(生物量、潜在矿化氮、土壤呼吸、水分含量和温度)。曹志洪^[4]提出了我国土壤质量指标体系的初步建议方案。其中土壤质量指标包括土壤有机质、速效钾、有效磷、pH、土层厚度、黏粒、容重、水稳性团聚体和微生物生物量等,并得出土壤质量指标隶属度值,进而进行土壤质量的评价。王效举和龚子同^[5]根据红壤丘陵地区的自然特点,选择了土层厚度、土壤质地、坡度、土壤有机质、全N、水解氮、速效磷、速效钾、全P、全K、阳离子交换量、pH共12个指标,用经验方法确定了各个指标的权重,引入相对土壤质量指数评论了土壤质量的变化。赵玉国等^[6]选择水分有效性、养分有效性和根系站立性3项土壤功能划分了权重,再对各功能下的分指标项赋予指标权重值,对海南岛典型样区的土壤质量进行了系统评价。以上土壤质量指标主要集中在土壤物理和土壤化学指标,而土壤生物学指标的应用较少,确定它们的最佳阈值是土壤质量评价中容易解决的,难的是应用土壤生物参数,如土壤微生物基础呼吸速率、微生物生物量碳(MBC)、生物量氮(MBN)、生物量磷(MBP)等指标的确定及其综合评价。

从以往的研究看,土壤物理和化学属性一直被用来作为表征土壤生产力、肥力和健康质量的指标,传统的理化指标已难以满足对土壤质量研究的需要。近年来,越来越多的证据表明,土壤生物学性质能敏感地反映出土壤质量的变化,是土壤质量评价不可缺少的指标且越来越受到重视^[1,20]。

生物学指标包括土壤上生长的植物、土壤动物、土壤微生物等,其中应用最多的是土壤微生物指标。土壤微生物研究分为3个层次:种群层次、群落层次、生态系统层次。生态系统层次的研究被认为是最好的快速评价土壤质量变化的可能方法^[21],土壤微生物(包括微生物生物量、土壤呼吸等)是土壤质量变化最敏感的指标^[22]。Sparling^[23]认为生物指标包括氮矿化、微生物生物量、微生物生物量对总C的比例、土壤呼吸、呼吸与微生物生物量的比例、动物种群、凋落物分解的比例。MBC能快速地对不同土地管理策略的变化^[24]。土壤微生物量曾被看作是土壤中所有有机物必定最后通过的“针眼”和其转化的重要驱动者,因此许多学者认为土壤生物特征的变化反映土壤质量的变化过程,是评价土地利用方式变化对土壤质量影响的重要指标^[25]。

微生物生物量常被用来评价土壤的生物学性状,可作为潜在的指标指示土壤有机质水平、平衡和未来的趋势,用于土壤质量的长期监测。MBC或MBN转化迅速,能在检测到土壤总C或总N的变化之前表现出较大的差异,是更具有敏感性的土壤质量指标。MBC对长期和短期施肥管理都很敏感,MBC和

MBN 可以指示土壤整体 C 和 N 转化和储存能力,同时也可以反映相应农作体系的优劣。因此, MBC 和 MBN 水平较高则土壤质量较高^[26]。土壤酶活性作为农业管理实践中土壤质量演变的生物活性指标已被广泛接受,能够反映出土壤质量在时间序列或各种不同条件下的变化,其测定值能合理估测某一个时刻土壤质量的状况^[27]。因而,将土壤酶活性作为土壤环境质量的整合生物活性指标能一定程度上反映土壤生物学状况^[28]。土壤生物指标是土壤内在的敏感因子,能灵敏指示土壤性质的变化,是土壤质量评价不可少的指标;且土壤生物指标对农业生产管理措施响应明显,可指示土壤肥力的动态变化^[29]。

3 土壤质量指标的时空变异

土壤受到内在因子(土壤形成因子)和外在因子(土壤耕作、施肥等)的影响,具有复杂的时间和空间变异性,性质变异影响着对土壤质量的评价。在对不同时间尺度的影响研究方面,通常是通过长期监测研究土壤质量指标的变化。但这种方法耗时长、花费高。一般的研究需要在较短时间内测定土壤的变化,而传统的估计与研究区域的采样位置有关,不可避免地存在短时间的微小变化与巨大的空间差异的矛盾。虽然地形断面和土链采样可以研究土壤的空间变化,但基于模型的地统计学方法,考虑了与时间和空间有关的随机过程对土壤性质的影响,是研究土壤时空变化的有效方法^[7]。

自 20 世纪 70 年代末我国开始研究土壤空间变异以来,国外学者已经对土壤属性的空间变异性开展了大量的研究工作。到 80 年代后期,研究者开始系统应用地统计学方法分析土壤肥力的时空变化过程^[30]。在区域尺度上, Yost 等^[31]较早运用地统计学进行了夏威夷岛土壤化学性质的空间相关性研究。 McGrath 和 Zhang^[32,33]借助地统计学和 GIS 技术,研究了爱尔兰草地表层土壤有机碳含量的时空分布特征。克立格插值结果表明,土壤有机碳含量的最高值在西海岸,在内陆和东南海岸含量相对较低,这种分布格局与降雨量的分布是一致的。土地利用变化或耕作并不能充分说明其空间的分异状况。孔祥斌等^[8]借助 GIS 技术,应用 Kriging 插值方法,分析研究了城乡交错带土壤肥力水平变化及其空间分布。研究表明,由于近 20 年土地集约利用和采用秸秆还田等土壤培肥技术,土壤有机质、全 N、碱解氮和速效磷含量均增加,而速效钾含量因作物产量增加且施用 K 肥不足,含量下降。在景观和田块尺度上, Cambardella 等^[34]在两个田块尺度范围内(6.25hm² 和 10hm²),研究了土壤质量指标(土壤有机碳、全 N、pH、容重、MBC、MBN 等)的空间分布格局。并表明在此尺度下 MBC 和 MBN 均属于中等程度的空间变异。John 等^[35]在加利福尼亚南部丛林生态系统中的 1 个 3m×10m 小地块取样,并对一系列的生物和化学参量进行了时空分析。这些变量在土壤中并没有随机分布,而是都有各自的分布方式;不管是高的还是低的活性,根生物量、细菌和真菌生物量、土壤养分都展现了较小的分离斑块面积。Sun 等^[36]在亚热带丘陵地区(2.2km²)利用地统计学方法,研究了土壤性质的时空变异和土壤质量的变化。分析结果表明:所有的土壤性质(pH、有机质、速效磷、速效钾)及其 12 年的变化都具有空间结构。土壤 pH 和速效钾的变程近似于丘陵小山的半径;并提出用地统计学方法作为一个潜在的分析工具来评价农场尺度下的土壤质量变化程序。在田块尺度(100m×100m)范围内, Yanai 等^[37]对表层土壤(0~10cm) N₂O 通量、全 C、全 N、pH、容重、速效磷、MBC、MBN 等进行了空间变异分析,并表明在此尺度下 MBC 和 MBN 的理论模型均属于线性模型。Gallardo^[38]用地统计学和变异系数描述了西班牙西北部的易涝平原森林中(1hm²) 20 种土壤性质的空间变异,包括必需的营养元素有机质、全 C、全 N、全 P 等。土壤性质的空间分布与微地形、植被以及环境梯度的方向有关,是当地各种异质性的总和。这些结果暗示了环境梯度不同程度上影响了生物和地质条件控制下的变量的空间分布。另外,洪伟和吴承祯^[9]提出应用人工神经网络方法建立半方差函数图模型,进而提出空间相关性分析新方法——ANN-Krige 方法,并结合实例进行了应用研究。结果表明,所提出的方法是可行的,其空间内插效果比传统地统计学方法明显更优,从而丰富和发展了地统计学的方法与理论。沈掌泉等^[10]应用广义回归神经网络来研究土壤养分的空间变异和广义回归网络的插值精度,并与地统计学方法的 Kriging 插值法进行比较,探索了广义回归神经网络在土壤性质空间变异和插值方面的应用潜力及特点。然而,它无法像地统计学方法那样定量描述土壤性质的空间自相关性,这也是其不足之处。因此,每一种方法都有其缺点,应根据实际情况、不同目的选用不同方法。

4 讨论与展望

土壤质量指标通常分为物理、化学和生物指标 3 种,但很难把这些动态联系又相互作用的指标截然分开,化学和生物学指标间的相互关系尤为突出,在反映土壤功能上很少有一对一的关系。在土壤质量评价

体系中所选择的土壤指标范围较窄,又由于土壤的生物学性质对人类活动的影响和外界环境条件的改变反映更敏感,所以在土壤质量评价选择指标时,应重点考虑土壤的生物学性质(如 MBC、MBN、MBP),这也是当今土壤质量评价应重视的重要方面。

由于土壤物理、化学、生物指标的相互作用过程在时空范围内明显不同和对土壤属性的量化措施和生产力关系的研究目前知之甚少,因此在时空范围内建立一个土壤质量具体标准的任务比较困难^[39]。特别是在空间范围内,建立简单、经济、有效的可测定指标和评价方法,还有相当大的研究工作要做。盲目建立一些并非有效的土壤质量标准及指标,用以评价和指导具体的管理实践,是非常不利于其可持续发展的^[40]。Visser 和 Parkinson^[41]明确提出与生态系统功能有关的 C、N 循环是土壤质量指标的基础。因此,研究土壤质量指标的时空变异又为 C、N 循环提供理论支持。

如此多的新指标和新观点,哪些对土壤质量的研究有更大意义? 哪些指标更能快速方便地检测? 在美国 1994 年出版的《土壤质量与持续环境》一书中有一些论述^[1],然而在我国还缺乏较系统的比较和报道,这是目前亟亟待解决的问题。实际上根据特定状况确定一套兼顾广泛性和专一性的最简单的土壤性质评价指标体系比寻找一个绝对的统一指标更有意义和更实用。迄今为止,还没有公认的或统一的土壤质量指标和量化的评价方法,尽管北美及欧洲的一些土壤学家在这些方面已取得了许多重要进展^[14]。因此,及时了解分析和跟踪国际土壤质量研究的最新进展和前沿,结合我国的实际情况,今后一段时间内的土壤质量研究工作应集中在土壤质量指标与评价方法、土壤质量演变过程与机理、不同时间尺度土壤质量动态变化规律及空间分布特点的研究等方面。

近年来,地统计学在国际上发展迅猛,特别是 GIS 的发展,对空间分析功能提出了一个新的要求,使得地统计学成为多学科重视的焦点。土壤质量指标空间变异性的研究方法由最初的经典统计学方法发展到了时序分析方法、地统计学方法、分形和分数维方法以及应用 GIS 的研究方法。今后在研究土壤质量指标空间变异性过程中,应尽可能采用新的研究方法进行处理,以便使分析和总结出的结论更接近田间实际情况。地理信息系统具有强大的数据管理和制图功能,可以将土壤特性的空间异质性以图形形式表达出来。因此,近年来地理信息系统和地统计学相结合来研究土壤质量指标的时空异质性已成为土壤学和环境地学研究的热点之一。但到目前为止,二者之间的结合还很少。地统计学软件的发展需要进一步的可视化研究,高质量的图形输入、输出,以及空间分析的需求,使得地统计学和 GIS 的结合成为一种必然的趋势。随着研究尺度的扩展,地理信息系统(GIS)结合空间模型分析已经成为土壤质量评价的发展趋势。这种综合研究方法在土壤质量指标的时空变异分析方面提高了定量性和可视化程度,对土壤质量的动态变化进行监测和预警提供决策基础。今后的研究应该进行大中小尺度的套合结构分析,以探索土壤质量指标空间变异性随采样结构变化的规律。另外,研究土壤质量指标的时空变异应与数学模型结合起来,从而实现对其未来演变趋势的把握,有利于更加合理地利用土地资源。然而,如何将土壤质量指标的时空变异性研究成果应用于生产实际,是土壤空间变异研究者们值得思考的问题。因此,需要针对区域环境特点,通过典型区域不同指标的多学科研究,在传统描述性研究基础上结合 GPS、RS、GIS 和空间分析模型等新的分析理论和技术,提出评价土壤质量敏感指标体系与空间分析方法并使评价系统趋于统一和完善,为不同区域土壤质量的时空分异规律和快速评价提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 赵其国,孙波,张桃林.土壤质量与持续环境.1.土壤质量的定义及评价方法.土壤,1997,29(3):113~120
- 2 张华,张甘霖.土壤质量指标和评价方法.土壤,2001,33(6):326~330
- 3 张海林.土壤质量和土壤可持续管理.水土保持学报,2002,16(6):119~122
- 4 曹志洪.解释土壤质量演变规律 确保土壤资源持续利用.世界科技研究与发展,2001,23(3):28~32
- 5 王效举,龚子同.红壤丘陵小区域不同利用方式下土壤变化的评价和预测.土壤学报,1998,35(1):135~139
- 6 赵玉国,张甘霖,张华,等.海南岛土壤质量系统评价与区域特征分析.中国生态农业学报,2004,12(3):13~15
- 7 孙波,周生路,赵其国.基于空间变异分析的土壤重金属复合污染研究.农业环境科学学报,2003,22(2):248~251
- 8 孔祥斌,张凤荣,王茹,等.基于 GIS 的城乡交错带土壤养分时空变化及格局分析——以北京市大兴区为例.生态学报,2003,23(11):2210~2218
- 9 洪伟,吴承祯. ANN——Krig 方法及其应用.福建农业大学学报,2001,30(3):309~314
- 10 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
- 11 Hoosbeek M.R., Bryant R.B. Towards the quantitative modeling of pedogenesis: a review. Geoderma, 1992, 55(3/4): 183~210

- 12 Pennock D.J., Anderson D.W., de Jong E. Landscape-scale changes in indicators of soil quality due to cultivation in Saskatchewan, Canada. *Geoderma*, 1994, 64(1/2): 1~19
- 13 Smith J.L., Halvorson J.J., Papendick R.I. Using multiple-variable indicator kriging for evaluating soil quality. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57(3): 743~749
- 14 Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., *et al.* Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61(1): 4~10
- 15 Parr J.F., Papendick R.I., Hornick S.B., *et al.* Soil quality: attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *Am. J. Altern. Agric.*, 1992, 7: 5~11
- 16 Soil Science Society of America. A framework for evaluating sustainable land management. *Can. J. Soil Sci.*, 1995, 75: 401~406
- 17 Doran J.W., Parkin T.B. Defining and assessing soil quality. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Madison, WI: SSSA Spec. Publ. 35. Am. Soc. Agron., 1994. 3~21
- 18 Powers R.F., Tiarks A.E., Boyle J.R. Assessing soil quality: practicable standards for sustainable forest productivity in the United States. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 54: 53~80
- 19 Larson W.E., Pierce F.J. Conservation and enhancement of soil quality. Workshop on evaluation for sustainable land management in the developing world. International Board for Soil Resource and Management. Proceeding no. 123 vol. 2. Bangkok, Thailand, 1991
- 20 John J.B., Moorman T.B., Kaarlen D.L., *et al.* Identification of regional soil quality factors and indicators. I. Central and southern high plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64(6): 2115~2124
- 21 Visser S., Parkinson D. Soil biological criteria as indicators of soil quality; soil microorganisms. *Am. J. Altern. Agric.*, 1992, 7(12): 33~37
- 22 Stenberg B. Monitoring soil quality of arable land; microbiological indicators. *Acta Agric. Scand., Sect. B—Plant Soil Sci.*, 1999, 49(1): 1~24
- 23 Pankhurst C., Doube B.M., Gupta V.V.S.R. *Biological Indicators of Soil Health*. New York: CAB International, 1997. 97~120
- 24 Roberson E.B., Sarig S., Shennan C., *et al.* Nutritional management of microbial polysaccharide production and aggregation in an agricultural soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1995, 59(6): 1587~1594
- 25 Jenkinson D.S., Rayner J.H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*, 1977, 123: 298~305
- 26 Garcia-Gil J.C., Plaza C., Soler-rovira P., *et al.* Long-term effects of municipal soil waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.*, 2000, 32(13): 1907~1913
- 27 Groffman P.M., McDowell W.H., Myers J.C., *et al.* Soil microbial biomass and activity in tropical riparian forests. *Soil Biol. Biochem.*, 2001, 33(10): 1339~1348
- 28 Taylor J.P., Wilson B., Mills M.S., *et al.* Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. *Soil Biol. Biochem.*, 2002, 34(3): 387~401
- 29 Trasar-Cepeda C., Seoane S. Towards a biochemical quality index for soils; an expression relating several biological and biochemical properties. *Biol. Fertil. Soils*, 1997, 26(2): 100~106
- 30 Trangmar B.B., Yost R.S., Wade M.K., *et al.* Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1987, 51(3): 668~674
- 31 Yost R.S., Uehara G., Fox R.L. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. I. Semi-variograms. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, 46: 1028~1032
- 32 McGrath D., Zhang C.S. Spatial distribution of soil organic carbon concentrations in grassland of Ireland. *Applied Geochemistry*, 2003, 18(10): 1629~1639
- 33 Zhang C.S., McGrath D. Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different periods. *Geoderma*, 2004, 119(3/4): 261~275
- 34 Cambardella C.A., Moorman T.B., Novak J.M., *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58(5): 1501~1511
- 35 John N.K., Matthias C.R., Michael F.A. Designing belowground field experiments with the help of semi-variance and power analyses. *Applied Soil Ecology*, 1999, 12(3): 227~238
- 36 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(1/2): 85~99
- 37 Yanai J., Sawamoto T., Oe T., *et al.* Spatial variability of nitrous oxide emissions and their soil-related determining factors in an agricultural field. *J. Environ. Qual.*, 2003, 32(6): 1965~1977
- 38 Gallardo A. Spatial variability of soil properties in a floodplain forest in northwest Spain. *Ecosystems*, 2003, 6(6): 564~576
- 39 Weetman G.F. A forest management perspective on sustained site productivity. *Forest Chron.*, 1998, 74: 75~76
- 40 Nambiar E.K.S. Sustained productivity of forests is a counting challenge to soil science. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60(6): 1613~1678
- 41 Visser S., Parkinson D. Soil biological criteria as indicators of soil quality; soil microorganisms. *Am. J. Altern. Agric.*, 1992, 7(1/2): 33~37