

苏北海涂围垦区表层土壤体积质量的空间异质性研究^①

姚荣江¹, 杨劲松^{1*}, 陈小兵², 邹平¹

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 山东烟台 264003)

摘要: 针对不当开发利用导致滩涂土壤理化性质恶化的现实状况, 以苏北海涂围垦区为研究区域, 应用地统计学方法研究了表土层体积质量这一物理性质的空间异质性。结果表明: 研究区表层土壤表现出紧实趋势, 各植被类型下表土层体积质量均为弱变异强度; 表土层体积质量的分布总体表现为各向同性, 较好地符合指数模型; 受结构性因素与随机性因素共同作用, 表土层体积质量表现为中等空间相关性。Moran's I 系数分析表明, 表土层体积质量呈较弱的相关关系, 随机性因素是引起其空间异质性的关键原因。水稻种植区表土层体积质量要明显高于棉花种植区, 其空间分布格局不仅与土地利用方式差异密切相关, 土壤质地差异也是较为重要的因素。该研究为海涂围垦区中、低产地及障碍土壤的合理利用与科学管理提供一定的参考依据。

关键词: 苏北; 海涂; 土壤体积质量; 空间异质性

中图分类号: S152.7

苏北地区海涂资源十分丰富, 在江苏省近千公里的海岸线上, 淤泥质平原海岸约占 93%, 滩涂面积约 $7.53 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占全国的 1/4 以上, 且淤泥质海岸每年淤长面积在 1334 hm^2 以上, 是非常重要的后备土地资源^[1-2]。目前来看, 土壤质量较差是制约苏北海涂土壤开发利用的主要障碍因子, 尤其是近年来沿海滩涂大面积推广利用种稻淋盐快速改良重盐土, 再加上没有适时进行深耕深翻, 这些都一定程度上加剧土壤理化性质恶化。因而, 开展土壤理化性状的调查对实现该区土壤资源的高效可持续利用具有重要意义。

土壤体积质量是土壤的一个基本物理性状, 它对土壤的透气性、入渗性能、溶质迁移特征以及土壤的抗侵蚀能力都有非常大的影响, 尤其在滨海滩涂这一高度盐渍化区域, 土壤体积质量状况往往与土壤改良、作物生长甚至水盐调控密切相关, 而自然条件下土壤体积质量由于受成土母质、成土过程、气候、生物作用及耕作的影响是一个高度变异的土壤性质^[3]。本文以典型苏北海涂围垦区为研究区域, 运用地统计学方法对土壤体积质量这一基本物理性状的空间异质性进行了深入分析和研究, 旨在了解该区土壤体积质量的空间变异特征, 揭示土壤体积质量的空间变异规律, 并为围垦区中、低产地及障碍土壤的合理利用、科学

改良与管理提供一定的参考依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究区域为江苏省大丰市金海农场, 地理位置介于 $32^{\circ}59'30'' \sim 33^{\circ}0'31''\text{N}$ 、 $120^{\circ}49'40'' \sim 120^{\circ}51'4''\text{E}$, 总面积约 180 hm^2 , 东距黄海约 4 km, 西临大丰麋鹿国家级自然保护区, 于 1999 年进行围垦。由于土壤发育于海相沉积物, 研究区域土壤质地较重, 以砂质壤土为主。该区地处北亚热带季风气候区, 具有明显的过渡性、海洋性和季风性, 四季分明, 年均降水量 1058.4 mm , 主要集中在 6—8 月份的雨季。由于当地缺乏蓄水工程, 雨季水量丰富但不能调蓄, 非雨季淡水资源紧缺, 农田灌溉一般采用当地微咸水。在研究区域东部的种植制度主要为水稻-油菜的一年两熟制, 西部则是棉花-大麦的一年两熟制。从图 1 显示的研究区域来看, 受种植模式的影响, 研究区东部和西部的排渠密度存在一定差异, 表现为东部水稻种植区域的排渠密度 (平均间距约 50 m) 明显大于棉花种植区域 (平均间距约 100 m)。

1.2 研究方法

在研究区范围内进行网格布点采样, 采样点平均

^①基金项目: 国家 863 计划重点项目(2007AA091702、2006AA10A301)、国家科技支撑计划项目(2006BAD05B04)、中国科学院南京土壤研究所创新领域前沿项目(200752010022)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-406-3)资助。

* 通讯作者 (jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 姚荣江(1980—), 男, 江苏靖江人, 博士, 助理研究员, 主要从事水土资源空间变异与溶质运移研究。E-mail: rjyao@issas.ac.cn

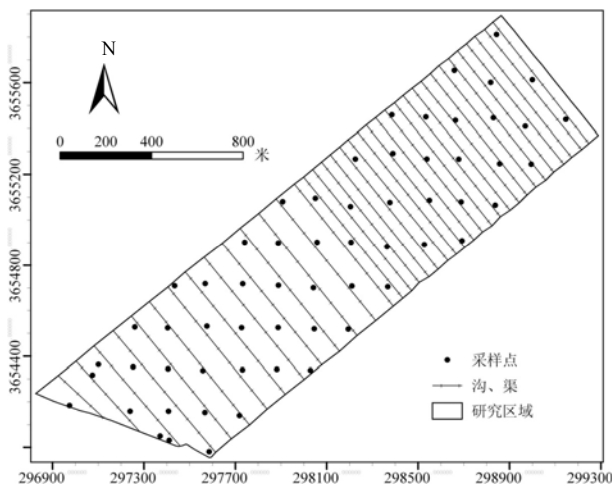


图 1 研究区域采样点位置的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of sampling sites in study area

间距大约 200 m。布设的步骤是：首先从该研究区最南端的边界作一东西向的平行线，并以此线为起点线由西向东作平行线（至最北端边界），各平行线的间距约 200 m；再由南向北作间隔 200 m 垂直于东西线的垂直线，最后以平行线与垂直线相交的“点”为采样点。在研究区共选取 60 个采样点，其中水稻地 25 个，棉花地 29 个，盐蒿杂草地 6 个，实际田间采样点分布如图 1 所示。鉴于表层 0 ~ 5 cm 土壤较易受外界扰动，本文以 5 ~ 10 cm 深度土壤体积质量作为表土层体积质量。每个采样点均对 5 ~ 10 cm 土层用容积 100 cm³ 环刀采取土样。样品采集于 2007 年 10 月下旬进行，正处于棉铃吐絮期的晚期（拔秆期）。将环刀采集的土

样带回实验室，于 105℃ 下烘 16 ~ 24 h 至恒重，称重并计算出土壤体积质量。

2 结果与分析

2.1 描述性统计特征

不同植被类型下各采样点表土层体积质量的统计特征值如表 1 所示。从平均值来看，各植被类型下土壤体积质量均较大（肥沃的耕层土壤体积质量一般在 1.0 g/cm³ 左右），说明了土壤紧实也是制约该地区农业生产的重要因素之一，其中水稻地表土层体积质量最大，达 1.401 g/cm³，高于棉花地和盐蒿杂草地，其原因主要在于研究区东部离海较近，土壤盐分相对较高，前茬通过种植水稻以大水洗盐，而淹水条件下土壤易沉降板结，导致孔隙度降低、体积质量增大。总体来看，各采样点土壤体积质量变化范围在 1.165 ~ 1.561 g/cm³ 之间，均值为 1.369 g/cm³。按照反映离散程度的变异系数大小进行分级可知，各植被类型下表层土壤体积质量均属于弱变异强度，这也说明体积质量是相对较为稳定的土壤属性。事实上，土壤体积质量的变异主要是受结构性因素（如地形、母质、土壤类型等）影响。此外，随机性因素（主要是耕作、灌溉等农田措施）对土壤体积质量变异产生的影响也不容忽视。进一步通过 Cochran 纯随机采样理论公式计算可知^[4]，在 95% 置信水平、5% 精度水平条件下（ $\alpha = 0.05$, $k = 0.05$ ），研究区各植被类型下土壤体积质量的合理采样数目分别为 9、6 和 5，总体的合理采样数为 8。由表 1 看出，体积质量的样点密度已完全满足当前条件下的合理采样数量要求。

表 1 不同植被类型表层土壤体积质量的统计特征值

Table 1 Statistical features of surface soil bulk density under various vegetation types

植被类型	样本数	最小值	最大值	平均值	中数	标准差	变异系数(%)	偏度	峰度	合理采样数
水稻	25	1.165	1.561	1.401	1.389	0.089	6.377	-0.282	0.894	9
棉花	29	1.220	1.527	1.346	1.352	0.066	4.935	0.450	0.635	6
盐蒿、杂草	6	1.245	1.401	1.340	1.350	0.054	3.992	-1.146	1.890	5
总体	60	1.165	1.561	1.369	1.363	0.080	5.830	0.281	0.485	8

注：合理采样数 $N = \lambda_{\alpha, f}^2 (C_v/k)^2$ ，其中 $\lambda_{\alpha, f}$ 为 t 分布特征值， C_v 为变异系数， k 表示精度水平， α 表示显著水平。

图 2a 显示了表土层体积质量的频数分布图，可以看出，土壤体积质量总体呈现出向左偏倚的分布特征，即体积质量在低值区具有较高的分布频数。考虑到数据的正态分布性是利用地统计学方法进行土壤特性空间结构分析的前提，只有当数据服从正态分布时，

Kriging 方法才有效，否则可能存在比例效应^[5-6]。P-P 正态概率图是一种检验正态分布的统计图形，它是根据变量分布累积比和正态分布累积比生成的图形。从图 2b 所显示的 P-P 正态概率图来看，土壤体积质量的实测累积概率和预期累积概率基本成一直线，符合近

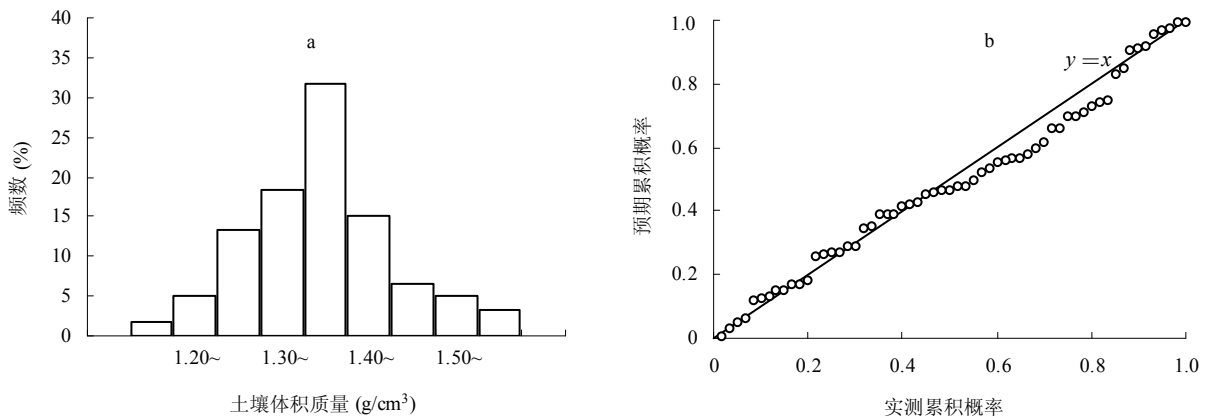


图 2 表层土壤体积质量的频数分布与 P-P 正态概率图

Fig. 2 Frequency distribution and normal P-P plots of surface soil bulk density

似的正态分布，已满足地统计学分析的要求。进一步的 Shapiro-Wilk 正态检验结果 ($p < 0.05$, 2-tailed) 亦表明土壤体积质量服从近似正态分布 ($p = 0.492$)，尽管对数转化能提高数据的正态性，但样本数据的非线性转化会掩盖原始数据的随机性，增加其规律性，可能会对空间结构分析的可靠性产生不利影响，因此未对原始数据作对数转化，随后的变异函数计算都是根据原始数据进行的。

2.2 空间异质性分析

半方差函数的理论模型及参数的确定可参考有关文献^[7-8]。由于土壤体积质量的空间变异是由地形、母质、土壤性质以及种植制度、耕作措施等多种因素在不同方向上共同作用的结果，考虑到研究区“南-北”和“东-西”方向上地形、土地利用方式存在一定的差异，为详细分析这些因素对表土层体积质量空间变异特征的影响，本文分别计算了NE0°、NE30°、NE60°、NE90° 共 4 个方向上的半方差函数，角度容差设为 45°，结果如图 3 所示。

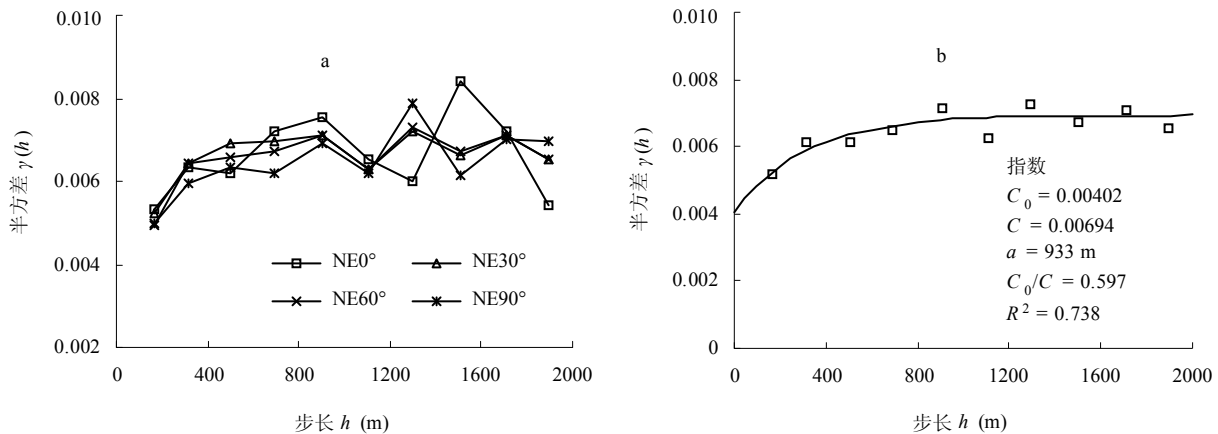


图 3 表土层体积质量不同方向的半方差函数及理论模型图

Fig. 3 Semivariogram in different directions and theory model of surface soil bulk density

从图 3a 显示的不同方向半方差函数来看，表土层体积质量的分布在不同方向上的差异并不明显，表现为各方向上的块金值、基台值和变程差异较小，不存在几何和带状各向异性，故可以认为其分布是各向同性的。各向同性条件下的半方差理论模型及参数如图 3b 所示，表土层体积质量较好地符合指数模型；其中，块金值 C_0 通常表示由实验误差和小于实验取样尺度引

起的变异；基台值 C 通常表示系统内总的变异； a 表示空间自相关距； C_0/C 表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比，它反映了土壤属性的空间依赖性，常被用作研究变量空间相关的分类依据^[9-10]。可以看出，表土层体积质量的 C_0/C 为 0.597，表现为中等的空间相关性，这说明表土层体积质量的空间分布是由结构性因素（如母质、地形、土壤类型等）和随机性

因素（如灌溉、耕作措施等各种人为活动）共同作用的结果，其中由随机性因素引起的空间异质性占到 59.7%，高于结构性因素的 40.3%。为进一步定量描述研究区域土壤体积质量的空间异质性，采用 Moran's I 系数来表征其在步长域的空间分布特征，将 Moran's I 系数与滞后距离相结合，便可得到不同尺度下空间相关关系变化，从而看出空间相关性随尺度的变化，结果如图 4 所示。

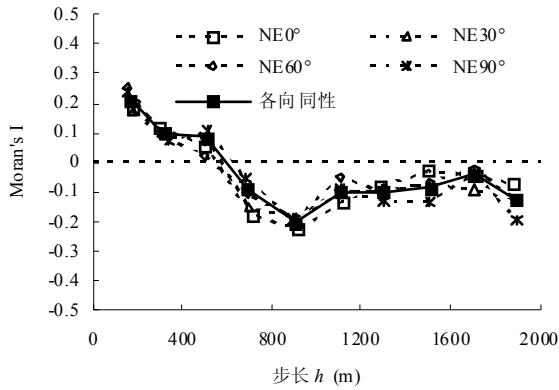


图 4 表土层体积质量的 Moran's I 系数

Fig. 4 Moran's I analysis of surface soil bulk density

Moran's I 系数可定量描述研究变量在空间上的依赖关系。I 的取值为 -1 ~ 1，I > 0 表示变量在空间上呈现正相关，I < 0 表示空间负相关，I = 0 表示空间依赖性小或空间随机变异较大^[11-12]。由图 4 可知，NE0°、NE30°、NE60°、NE90° 4 个方向上 Moran's I 系数呈现出相同的规律，总体表现为各向同性。在各向同性条件下，当空间距离 < 600 m 时，体积质量表现为正相

关性，>600 m 则开始呈负相关性；当空间距离在 900 m 以内时，Moran's I 系数随着空间距离不断降低，正相关性逐渐减弱，负相关性逐渐增强，至 900 m 时相关性降至最小 (I = -0.205)；当空间距离 > 900 m 后，Moran's I 系数在 -0.043 ~ -0.128 之间波动，表现为弱空间负相关性。总体看来，土壤体积质量的空间相关性一直较弱，Moran's I 系数介于 -0.205 ~ 0.212 之间，变幅范围较窄，说明体积质量的空间异质性主要由随机因素引起，这与局部地块的人为农业活动如施肥、灌溉、耕作等有密切的关系。

2.3 Kriging 空间插值分析

利用 ArcGIS 对表土层体积质量进行 Kriging 空间内插，具体的理论模型和参数见图 3b，得到的表土层体积质量空间分布如图 5a 所示，并获取其预测标准误差分布图 (图 5b) 以检验 Kriging 估值精度。

由图 5a 看出，表土层体积质量的空间分布呈明显条带状与斑块状格局。从空间尺度来看，表土层体积质量表现出东部高、西部低的分布规律，即水稻种植区域表土层体积质量显著高于棉花种植区域；空间分析结果亦表明，东部水稻种植区域表土层体积质量均值达 1.41 g/kg³，这是由于淹水条件下土壤易沉实板结，孔隙度降低，体积质量增大，因而在下茬作物种植前宜进行深耕深翻以改善表层土壤透气透水性；西部棉花种植区域为 1.34 g/cm³，由于该地区棉花种植普遍采用地膜覆盖以改善田间墒情和防止苗期土壤返盐，因此，其受降雨、灌溉等自然和人为农业活动影响较小，与水稻地相比质地较轻、孔隙度较好。从局部上看，体积质量的最低值在研究区的中间部位，且在该范围内空间变异性较大；最大值在研究区的中东部位，这

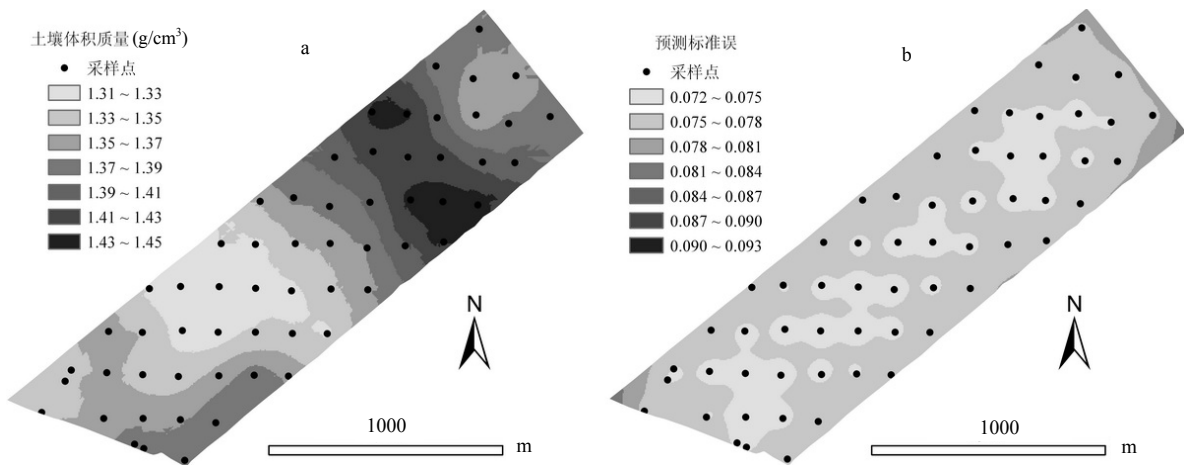


图 5 表层土壤体积质量的空间分布及预测标准误差图

Fig. 5 Spatial distribution and prediction standard error maps of surface soil bulk density

种分布格局不仅与土地利用方式差异密切相关, 土壤质地差异也是导致该现象的重要因素。从图 5b 来看, 体积质量预测标准误差主要介于 $0.072 \sim 0.078 \text{ g/cm}^3$ 之间, 具有较好的估值精度; 事实上, 进一步交叉验证结果亦表明, 表土层体积质量实测值和预测值间呈极显著相关性 ($r=0.47$, $p<0.01$), 说明本研究中表土层体积质量的 Kriging 预测具有较高的精度和可信度。

3 结论

(1) 研究区表层土壤体积质量总体较大, 表现出一定的紧实趋势, 其中水稻地体积质量最高; 各植被类型下表土层体积质量均属于弱变异强度, 且满足 95% 置信水平、5% 精度水平的合理采样数要求; P-P 正态概率图表明表土层体积质量符合正态分布。

(2) 表土层体积质量的分布在不同方向上差异不明显, 总体表现为各向同性, 且较好地符合指数模型; 受结构性因素与随机性因素共同作用, 表层土壤体积质量表现为中等的空间相关性; Moran's I 系数分析表明, 表土层体积质量呈较弱的相关关系, 随机性因素是引起其空间异质性的关键原因。

(3) 表土层体积质量的空间分布表现出东部高、西部低的分布规律, 水稻种植区域表土层体积质量明显高于棉花种植区域, 该分布格局不仅与土地利用方式差异密切相关, 土壤质地差异也是导致该现象的重要因素; 标准误差图与交叉验证表明表土层体积质量的 Kriging 预测具有较高的精度和可信度。

参考文献:

- [1] 王资生, 阮成江, 郑怀平. 盐城滩涂资源特征及可持续利用对策. 海洋通报, 2001, 20(4): 64-69
- [2] 陈洪全. 苏北沿海港口开发与可持续发展研究. 海洋科学, 2000, 24(1): 52-54
- [3] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤体积质量和饱和导水率空间变异特征. 水土保持学报, 2004, 18(3): 53-56
- [4] Cochran WG. Sampling Techniques. 3 rd. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1977
- [5] 李哈滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法. 应用生态学报, 1998, 9(6): 651-657
- [6] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征—变异函数与 Kriging 插值分析. 地理学报, 2000, 55(5): 555-566
- [7] Zhang SR, Sun B, Zhao QG, Xiao PF, Shu JY. Temporal-spatial variability of soil organic carbon stocks in a rehabilitating ecosystem. Pedosphere, 2004, 14(4): 501-508
- [8] 李艳, 史舟, 王人潮, 黄明祥. 海涂土壤剖面电导率的协同克立格法估值及不同取样数目的比较研究. 土壤学报, 2004, 41(3): 434-443
- [9] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙. 黄河三角洲土壤盐分空间变异性与合理采样数研究. 水土保持学报, 2006, 20(6): 89-94
- [10] 盛建东, 杨玉玲, 陈冰, 武红旗. 土壤总盐、pH 及总碱度空间变异特征研究. 土壤, 2005, 37(1): 69-73
- [11] 贾晓红, 李新荣, 周海燕, 樊恒文, 赵金龙, 李元寿. 黄灌沙区农田耕层土壤性状空间异质性分析. 水土保持学报, 2005, 19(5): 101-104
- [12] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究. 农业工程学报, 2005, 21(8): 11-16

Spatial Heterogeneity of Surface Soil Bulk Density in Coastal Region of North Jiangsu Province

YAO Rong-jiang¹, YANG Jing-song¹, CHEN Xiao-bing², ZOU Ping¹

(¹ Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

² Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China)

Abstract: Aiming at the deterioration of soil physico-chemical properties due to the improper exploitation and utilization of soil resources in the coastal region, spatial heterogeneity of soil physical property of surface bulk density was analyzed by using geostatistical method, which was performed in coastal reclamation region of north Jiangsu Province. The results indicated that surface soil showed a compaction trend, and the variation of bulk density under various vegetation types was rather weak. Surface soil bulk density generally exhibited isotropy and exponential model was fitted to its semivariogram. Bulk density exhibited moderate spatial autocorrelation owing to compound impact of structural and stochastic factors. Moran's I coefficient analysis proved that bulk density showed weak spatial dependency, and stochastic factors were the crucial reason of the spatial heterogeneity. Bulk density in rice field was significantly higher than that in cotton field, and the spatial distribution of bulk density was related to differences in both land use patterns and soil textures. The research results can serve as a theoretical reference to the rational utilization and scientific management of moderate-and-low-yield farmlands and obstacle soils in coastal region.

Key words: North Jiangsu, Coastal region, Soil bulk density, Spatial heterogeneity