

不同土地利用方式下崇明岛土壤酶与有机质空间分布特征

高 扬^{1,2}, 汪亚峰³, 何念鹏², 毛 亮⁴

(1.中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 2.中国科学院成都山地所 山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; 3.城市与区域生态国家重点实验室, 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 4.上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240)

摘 要: 本文通过采集崇明岛 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 的三层土壤, 利用地统计学方法研究崇明岛的土壤酶和有机质的空间分布特征, 为合理利用崇明岛土地和提高其土壤质量提供参考依据。研究结果表明: 不同土地利用方式下, 工业用地的土壤有机质含量最高, 河道旁、林地和农业用地的土壤有机质含量随土壤深度增加显著减少, 其中农业用地的土壤有机质含量随土壤深度的变化要小于林地和河道旁。通过半变异函数和 Moran's I 函数方法研究发现, 崇明岛的土壤酶空间变异主要是由随机因素引起的, 异性变异以崇明岛东西走向为主, 而崇明岛南北方向发生异性空间变异要小于东西方向; 通过空间插值方法研究发现, 土壤酶活性主要由中部的镇中心以及居民和工业区向东部的东滩湿地以及北沿农场逐渐降低, 并且随土层深度增加土壤酶高活性的区域逐渐减小。

关键词: 地统计; 空间变异; 土壤酶; 土地利用

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)01-0021-08 **doi:** 10.11654/jaes.2013.01.004

Spatial Distribution Characteristic of Soil Enzymes Activity and Organic Matter Under Different Land Use Management Chongming Island

GAO Yang^{1,2}, WANG Ya-feng³, HE Nian-peng², MAO Liang⁴

(1.Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; 2.Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041; 3.State Lab of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China; 4.School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

Abstract: The paper present spatial distribution characteristic of soil enzymes and organic matter under different land use managements using a geostatistics method, which provide the scientific basis for soil utilization and facilitate soil quality. The 0~20 cm, 20~40 cm and 40~60 cm soil layer in Chongming Island were sampled. The results showed that, under different land use management, the organic matter content was highest in industrial soil, and the organic matter content in river way, forestry and farmland decreased significantly with increasing soil depth. Through semivariogram and Moran's I analysis, we found that soil enzymes spatial variability in Chongming Island were mostly due to random factor, and anisotropic correlogram occur at west-east direction, in which anisotropic spatial variability was smaller from north-south than from west-east direction. Through spatial interpolation analysis, we found that soil enzymes gradually decreased from Chongming midland, living area and industrial districts to eastern wetland and northern farmland. In addition, the soil enzyme activities and high activity area gradually decreased with increasing soil depth.

Keywords: geostatistics; spatial variability; soil enzyme; land use

土壤酶是土壤生物化学过程的主要调节者^[1], 与有机物质分解、营养物质循环、能量转移、环境质量等

密切相关^[2-3], 参与土壤环境中的一切生物化学过程。酶的分解作用是物质循环过程的限制性步骤^[4], 如脲酶可以降解有机物, 促其水解成氨和二氧化碳; 土壤磷酸酶直接影响土壤有机磷的分解转化及其生物有效性; 土壤脱氢酶活性与氧的消耗以及土壤微生物的活性密切相关。因此, 土壤酶活性常作为表征土壤肥力的指标之一^[3-5]。Acosta-Martínez^[6]报道中指出不同

收稿日期: 2012-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(31200404); 中国科学院成都山地所山地表生过程与生态调控重点实验室开放基金(Y2R20050 DD)

作者简介: 高 扬, 博士, 助理研究员, 主要从事地球化学循环及环境修复研究。E-mail: gaoyang@igsnr.ac.cn;
E-mail: gaoyang0898@163.com

土地利用方式下,土壤酶和生物群落随土层深度和土壤养分变化呈显著性差异;Sudipta^[7]指出沿海以及岛屿地区的次生盐渍化土壤随季风和季节的变化呈现规律性变化。目前,国内外对不同类型土地下、不同植被覆盖下以及不同植被生长年限下,土壤酶以及土壤微生物变化都作了很多相关的报道^[8-11]。冲积岛屿以及围垦地处于水域和陆地过渡地段的特殊生态系统,普遍被认为具有营养汇的功能^[12],积累了大量有机质,而土壤有机质的分解速率又决定了营养物质的再生速率和植物的吸收利用效率^[13]。因此,土壤酶的分解作用参与并控制着冲积岛屿和围垦地土壤中的生物化学过程在内的自然界物质循环过程,土壤酶活性的高低直接影响物质转化循环的速率,并对冲击岛屿生态系统功能有很大的影响。

地统计通过污染物空间分布规律以及不确定性估值的方法被广泛用于评估土壤污染水平以及污染区域的风险;同时,地统计学方法更便于量化土壤参数的空间特征以及操作空间内插值法^[14]。因此,地统计学与GIS结合将成为研究空间不确定性和风险评估更有用的工具^[15-16]。随着崇明岛非农建设用地比重不断增长,土地利用结构呈现多元化趋势,势必加剧崇明岛生态环境压力。本文以崇明岛为例,结合地统计学方法和GIS技术,研究不同土地利用方式下土壤酶及有机质的变化,重在揭示崇明生态岛屿在不同土地利用和管理方式下土壤质量的空间演替规律,为合理利用崇明岛以及提高土壤质量提供决策基础和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

崇明岛地处长江入海口,是全世界最大的河口冲积岛和沙岛,自1956年以来,上海市政府开始组织对崇明岛滩涂湿地进行多次大规模的围垦,围垦的面积达244 km²,已超过崇明岛围垦前的面积。崇明岛位于西太平洋沿岸中国海岸线的中点地区(121°09′30″~121°54′00″E,31°27′00″~31°51′15″N),全岛面积1267 km²,东西长80 km,南北宽13~18 km,是仅次于台湾岛和海南岛的中国第三大岛屿。崇明岛由长江下泻的大量泥沙在江海作用下不断加积而成,由于长江口泥沙的淤积,使岛屿滩涂成为一个不断淤涨的土地资源。崇明岛是上海最具潜在战略意义的发展空间之一,上海市已确立把崇明岛建设为全国最大的生态岛。崇明岛地处北亚热带,气候温和湿润,年平均气温

为15.3℃,月平均气温以1月的2.8℃为最低,以7月的27.5℃为最高;年平均降水量为1003.7 mm,降水主要集中在4—9月,平均每月降水量都在100 mm以上(102.8~1400 mm)。崇明县全年平均日照时数为2104 h,8月日照时数最多,为254.1 h。崇明岛土地利用方式主要分为6类:工业用地、河道用地、农业用地、林地、湿地和生活用地。

1.2 土壤理化性质

全岛土壤质地以中壤和轻壤为主,中壤质地占52.47%,轻壤质地占34.22%,土壤质地从岛中央向外呈扩散变轻的趋势;土壤偏碱性,平均pH值为(8.20±0.153),土壤全氮平均含量为1.09 g·kg⁻¹,有机质平均含量为18.8 g·kg⁻¹,速效磷平均含量为9.80 mg·kg⁻¹,均属偏低水平^[17]。土壤重金属污染除Cd超过国家三级标准外,其他重金属含量均未超标,崇明土壤总体上生态风险系数较低^[17]。

1.3 样品采集与分析

采样点设置主要根据2 km×2 km网格布点法,利用GPS定位,在每个网格内采集方形4个角以及方形中心土样均匀混合,每个样点采集0~20、20~40 cm和40~60 cm 3层土壤,每层约采集1 kg鲜土,装入无菌袋中。共设置99个采样点(图1),3层土壤总共297个样品,采样时间为2008年8月下旬。样品采集完后立即送至实验室完成土壤酶以及土壤有机质等相关分析实验。

土壤磷酸酶的测定采用对硝基苯磷酸二钠法,以每千克土产生酚的毫克数表示;脲酶的测定采用靛酚蓝比色法,以每千克土产生NH₄-N的毫克数表示;脱氢酶采用对硝基苯酚比色法,以TPF毫克每千克鲜土表示^[18]。有机质测定方法采用重铬酸钾容量法^[19]。

1.4 地统计评价模型

本研究主要采用半变异函数和Moran's I函数方法研究土壤酶空间变异和空间自相关性。半变异函数是分析变量空间结构的主要工具,用以反映变量的空间自相关性^[20]。根据公式(1)计算半变异函数 $\gamma(h)$ 的散点图,并用不同类型的模型进行拟合,计算其参数及拟合度最好的模型类型^[21]。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (1)$$

式中: $Z(x_i)$ 为 x_i 点位的观测值, $N(h)$ 为由距离 h 分隔的观测点的对数, h 为观测步长。

Moran's I是地统计中应用最广的一个参数,可以用来进行全程空间自相关性和局部空间自相关性分析,

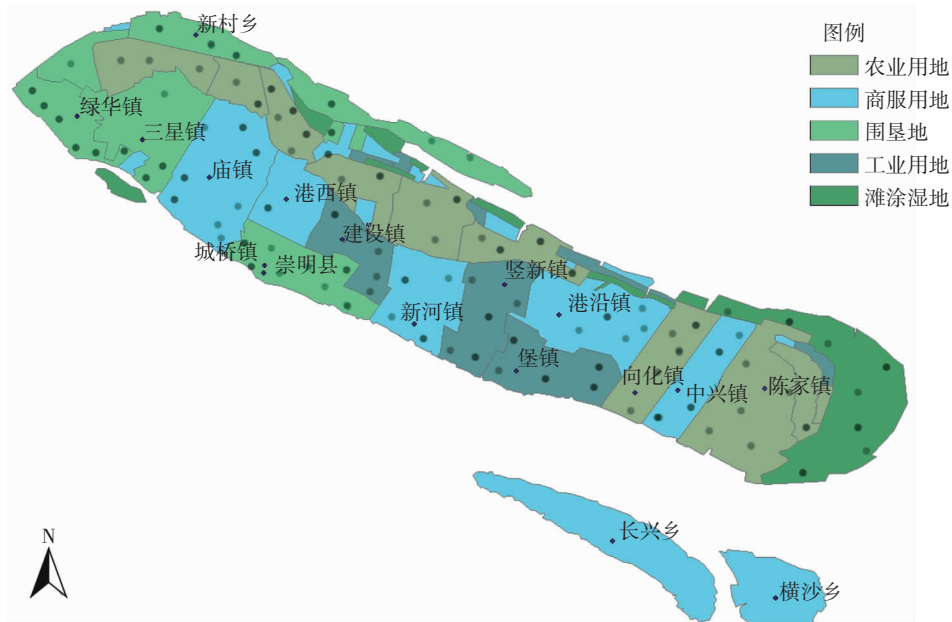


图 1 崇明岛土地利用方式及采样点分布图

Figure 1 Land use and sample point distribution in Chongming Island

计算见公式(2)。

$$I(h)=N(h)\sum\left(\sum Z_iZ_{i+h}/\sum Z_{i+h}^2\right)\tag{2}$$

式中: $I(h)$ 为 Moran'sI 参数, Z_i 为在 i 点的观测值, Z_{i+h} 为在 $i+h$ 点的观测值。

1.5 数据处理

运用 SPSS11.0 统计分析软件对数据进行方差分析、相关分析和聚类分析,地统计学分析采用 GIS 软件拟合半变异函数和 Moran'sI 函数,建立拟合模型和参数。

2 结果与分析

2.1 土壤酶空间变异特征

如表 1 所示,不同土地利用方式下 3 种酶的对数

值基本服从正态分布;不同土层的工业土壤酶活性平均值和偏差普遍高于其他土地利用类型;农地和生活区的磷酸酶活性均值随土层深度增加先增大后减小,其他土地利用类型的磷酸酶活性逐渐减小;生活区的第二层脲酶活性均值要高于表层土壤,其他土地利用类型的脲酶活性均值随土层深度增加逐渐降低;农地、生活区和湿地的脱氢酶活性均值随土层深度变化逐渐减小,其他土地利用类型的脱氢酶活性均值随土层深度增加先减小后增大。

不同土层深度下,3 种酶的理论模型均能很好地拟合成高斯、指数和球面模型,其中以指数模型占多数,不同土层酶的半变异模型的拟合度均在 0.69 以上,说明选取的模型符合要求。由表 2 可以看出,崇明岛酶分布的基台值比较高,均大于块金值 3 倍以上,

表 1 不同土地利用方式下土壤酶的统计描述

Table 1 Descriptive statistics of the soil enzymes change in Chongming Island under different land use

土地类型	酶类型	土层/cm	<i>n</i>	平均值	标准偏差	最大值	最小值	峰值	偏斜度	分布类型
工业	磷酸酶	0~20	14	276	205	598	65	-1.01	0.41	正态
		20~40	14	230	147	478	78	-0.65	0.56	对数
		40~60	14	222	166	416	20	-1.52	-0.22	正态
河道	磷酸酶	0~20	15	279	91	405	171	-1.32	0.41	对数
		20~40	15	232	92	364	115	-1.10	-0.02	正态
		40~60	15	178	72	288	95	-1.12	0.27	正态
林地	磷酸酶	0~20	12	245	109	492	145	0.80	1.50	对数
		20~40	12	208	71	323	115	-1.08	0.24	正态
		40~60	12	166	91	396	52	1.39	1.35	对数

续表 1 不同土地利用方式下土壤酶的统计描述

Continued table 1 Descriptive statistics of the soil enzymes change in Chongming Island under different land use

土地类型	酶类型	土层/cm	<i>n</i>	平均值	标准偏差	最大值	最小值	峰值	偏斜度	分布类型
农地	磷酸酶	0~20	27	128	65	364	48	4.53	1.95	对数
		20~40	27	165	66	284	59	-1.12	0.23	对数
		40~60	27	151	65	331	48	0.38	0.80	对数
生活	磷酸酶	0~20	14	185	52	241	111	-1.25	-0.45	对数
		20~40	14	214	79	329	100	-1.26	0.16	对数
		40~60	14	165	40	219	100	-0.84	0	正态
湿地	磷酸酶	0~20	17	268	82	362	180	-1.68	0.09	正态
		20~40	17	253	78	366	171	-1.14	0.36	正态
		40~60	17	174	36	238	124	-1.16	0.27	正态
工业	脲酶	0~20	14	377	379	948	7	-1.27	0.40	正态
		20~40	14	372	370	898	3	-1.35	0.37	正态
		40~60	14	364	261	815	118	-0.53	0.86	对数
河道	脲酶	0~20	15	308	150	423	17	0.51	-1.39	正态
		20~40	15	304	251	595	10	-1.70	-0.01	正态
		40~60	15	188	175	492	3	-0.48	0.83	对数
林地	脲酶	0~20	12	259	201	681	4	0.06	0.95	对数
		20~40	12	279	252	793	5	-0.21	1.09	正态
		40~60	12	193	259	773	3	0.17	1.22	正态
农地	脲酶	0~20	27	272	174	646	5	-0.45	0.41	正态
		20~40	27	141	160	587	4	1.38	1.48	正态
		40~60	27	97	110	329	3	-0.70	0.92	正态
生活	脲酶	0~20	14	168	112	300	20	-1.57	-0.36	对数
		20~40	14	220	217	707	28	1.29	1.55	正态
		40~60	14	144	218	524	3	-0.71	1.06	正态
湿地	脲酶	0~20	17	359	262	692	83	-1.53	0.12	正态
		20~40	17	249	209	570	38	-0.89	0.63	正态
		40~60	17	131	118	249	7	-1.75	-0.14	正态
工业	脱氢酶	0~20	14	293	256	633	18	-1.52	0.15	正态
		20~40	14	207	234	640	27	-0.04	1.17	正态
		40~60	14	317	248	766	118	-0.25	1.11	正态
河道	脱氢酶	0~20	15	231	141	437	85	-1.36	0.35	正态
		20~40	15	94	53	184	33	-0.45	0.63	对数
		40~60	15	128	102	313	26	-0.05	0.98	正态
林地	脱氢酶	0~20	12	287	293	993	69	1.12	1.57	正态
		20~40	12	94	103	293	14	-0.08	1.29	正态
		40~60	12	128	216	727	19	3.10	2.11	正态
农地	脱氢酶	0~20	27	158	123	473	26	0.42	1.17	正态
		20~40	27	149	95	354	27	-0.57	0.59	正态
		40~60	27	135	107	391	25	0.60	1.26	正态
生活	脱氢酶	0~20	14	170	81	321	67	-0.35	0.53	对数
		20~40	14	85	56	178	25	-0.94	0.57	正态
		40~60	14	57	45	142	20	-0.71	0.88	正态
湿地	脱氢酶	0~20	17	244	149	437	106	-1.63	0.38	正态
		20~40	17	118	69	215	34	-1.06	0.22	正态
		40~60	17	81	44	125	27	-1.67	-0.33	对数

表 2 土壤半变异函数及 Moran'sI 参数主要特征

Table 2 Characteristics of Semivariogram and Moran'sI parameters for soil enzymes

土层/cm	酶类型	拟合模型	R^2	块金值	基台值	块金/基台	Moran'sI	
							$I(h)$ 最大值	最大变异度数
0~20	磷酸酶	exponential	0.79	3580	13 450	0.734	-1.09	45°
20~40	磷酸酶	exponential	0.72	1440	7180	0.799	-0.9	45°
40~60	磷酸酶	spherical	0.74	6450	28 238	0.772	-0.54	0°
0~20	脲酶	exponential	0.89	13 300	45 700	0.709	-0.69	0°
20~40	脲酶	exponential	0.79	14 800	55 340	0.733	0.66	0°
40~60	脲酶	exponential	0.76	9680	39 100	0.752	0.60	45°
0~20	脱氢酶	guassian	0.69	10 500	34 720	0.698	-0.98	45°
20~40	脱氢酶	exponential	0.78	3290	12 240	0.731	-0.75	45°
40~60	脱氢酶	exponential	0.84	7990	25 150	0.682	-0.99	45°

说明各种酶在空间上的半变异主要是由于系统内变异造成,而非较小尺度取样引起的;基底效应值普遍较大,说明酶的分布及演化规律受随机因素影响较多,同时不同土壤酶随土层深度以及土地利用类型变化呈显著相关(>0.68)。Moran'sI 值越大,表明数据的空间正相关性越强,如表 2 所示,表层土壤的酶活性具有更高的空间正相关性,也就是空间聚集性,同时 3 种酶在东西方向上变异性和异性相关性要高于南北方向(45° 和 90° 为东西方向, 0° 和 135° 为南北方向)(图 2)。

2.2 土壤有机质变化

如图 3 所示,除林地外,工业土壤的有机质变化与其他土地利用类型有机质含量变化无显著差异;河道用地与湿地的有机质含量变化相似,其他土地利用类型的有机质含量随土层深度变化差异显著。工业用地土壤的有机质平均含量高于其他土地利用类型,其表层土壤有机质含量(34.5 ± 19.15) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 高于第二层和第三层土壤,并且差异显著;河道用地(25.5 ± 14.4) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、林地(20.6 ± 20.7) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和农业用地(20.7 ± 8.3) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤有机质含量随土壤深度增加显著减小,农业用地的有机质平均含量随土壤深度变化要小于林地的和河道旁的;生活区土壤的有机质平均含量随土层深度变化较小,差异不显著,而湿地表层有机质平均含量要显著高于其第二、三层。

3 讨论

3.1 土地利用演替对土壤酶分布影响

块金值通常表示由实验误差和小于实验取样尺度引起的变异,基台值通常表示系统内总的变异。块金与基台的比值叫基底效应,可以用来说明空间变异特征,该值越大,说明空间变异更多是随机成分引起的,空间相关性强弱可用基底效应表示,该值越高表明空间相

关性越强。半变异函数的块金/基台值在 0.68 之上,除了说明土壤酶随土层深度以及土地利用类型变化呈显著相关外,也说明空间变异主要是由随机因素引起的,如施肥、耕作措施、种植制度等人类活动使得土壤酶的空间相关性减弱,并向均一化方向发展,而结构性因素如气候、母质、地形、土壤类型等对其影响不够显著。

通过 Moran'sI 函数研究发现,土壤酶的空间变异主要以崇明岛东西走向为主,而岛南北方向发生异性空间变异要小于东西方向,这可能是由于崇明岛作为一个冲积岛屿并不断进行围垦,围垦主要向东西扩展,而南北方向扩展相对较小。土壤酶的活性主要由中部的镇中心以及居民和工业区向东部的东滩湿地和西部以及北沿农场逐渐降低,并且随土层深度增加,土壤酶高活性的区域逐渐减小。农地和河道旁土壤的磷酸酶活性具有较高的同质性,3 层土壤的磷酸酶活性变化较小,其他土地利用类型土壤的磷酸酶活性均呈现不同程度的异质性;农地和工业区土壤的脲酶活性具有较高的同质性,变异程度较小;而农业用地和工业用地土壤的脱氢酶活性和脲酶一样,3 层土壤的脱氢酶活性变异不显著。

由于岛屿和陆地的土地利用演替方式不同,岛屿的土地首先通过围垦湿地造田,种植作物改善围垦地的盐碱状况而后逐渐向农田转换,然后再从农田向林地、生活用地以及工业用地等功能用地转换,如此循环,即农田在岛屿中扮演承上启下的作用。崇明岛农田普遍采用保护性耕作,增加了土壤总体酶活性和供肥能力,特别是对表层和亚表层土壤,效果更为明显。这是因为保护性耕作减少了土壤的扰动次数,维持了土壤良好的通透性,有较好的团粒结构,导致表层土壤的有机质含量增多,有机质的增多又导致土壤微生物增多,从而更有利于土壤酶活性的增

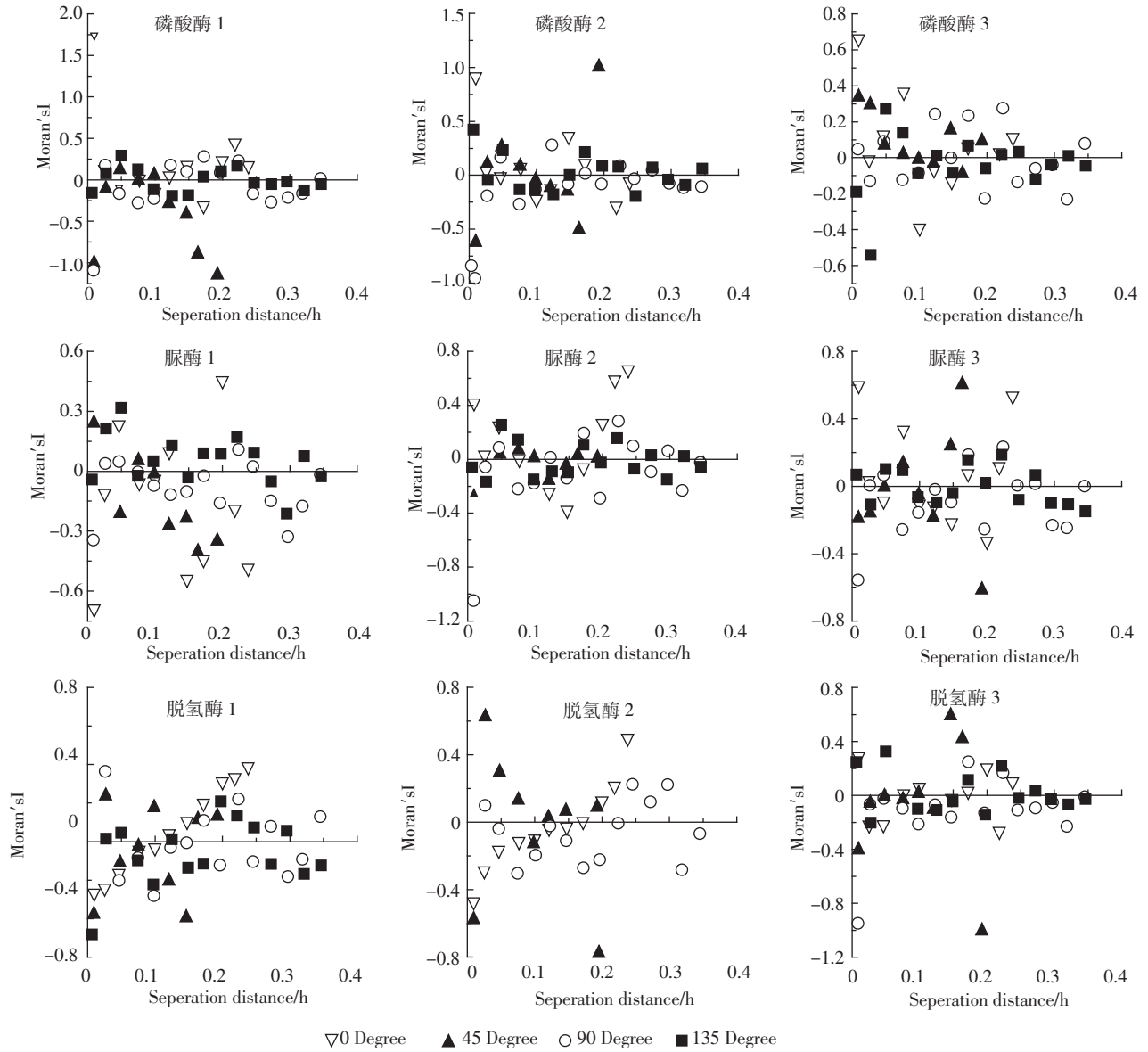


图 2 土壤酶活性 Moran's I 参数异性变异图

Figure 2 Anisotropic variability of Moran's I parameter on soil enzyme activity

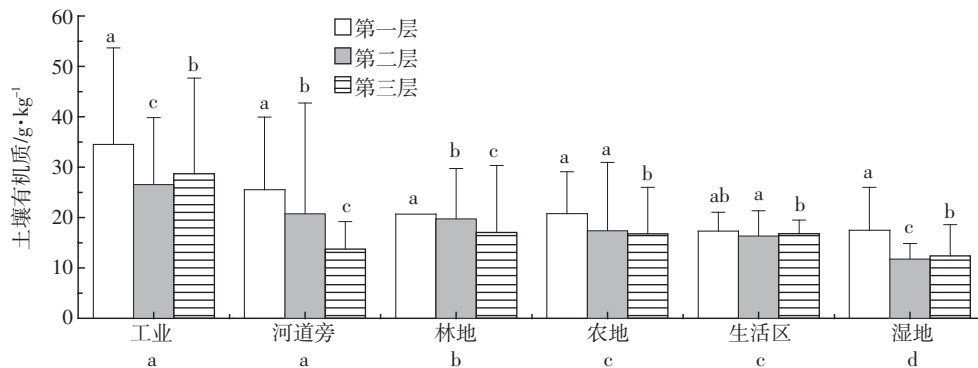
图形上字母表示组内差异, $P < 0.05$; 图形下方字母表示组间差异, $P < 0.05$ 。

图 3 不同土地利用方式下土壤有机质变化

Figure 3 Change of soil organic matter under different land use

加^[22-24],同时养分的渗透迁移也有利于保持土壤酶活性的均一性。农田向林地的演替过程中,植物群落的演替,提高了土壤肥力,为生态系统的发育和演替提供了基础,土壤微生物和动物的多样性则增加了林地土壤酶变化的不均匀性。工业区土壤由于功能单一以及固定的工业排放,使得土壤酶的反应底物比较单一,一些酶的分布随土层变化也比较均一。生活区由于人类活动的强烈干扰,酶的分布呈现出很强的不确定性,没有明显的规律。湿地经过围垦逐渐向农田过渡,土壤酶、养分以及有机质等随着湿地盐碱度的改善,经历由表层到深层土壤逐渐提高的过程。

3.2 土壤有机质与酶活性相关性特征

土壤有机质是评价土壤肥力的一项重要指标,与多种土壤养分相关^[10,25]。如图4所示,土壤有机质与土壤酶活性拟合度(R^2)均大于0.5,土壤酶与有机质相对应的点较好地分布在1:1线周围。深层土壤的有机质含量与酶的相关性要高于表层土壤,以脲酶最高。本研究发现土壤有机质含量随土层深度变化显著减少,农业用地和林地表层由于施肥因素以及生物覆盖、枯枝落叶以及动物粪便等分解,在雨水淋溶下引起养分垂直迁移^[26-28],同时农地和林地受人类活动的影响相对较小,所以其不同土层间有机质含量差异相对要比其他类型小;工业用地由于工业垃圾以及废水和污泥的排放造成表层土壤有机质含量显著增加,河道旁以及湿地随土层深度增加,底层土壤与海水接触盐碱含量高,而表层土壤由于动植物的大量繁殖,同时湿地营养汇的功能^[14],积累了大量有机质。由此可见崇明岛表层土壤有机质的演变规律主要是以岛中央的工业区和生活区为中心(围垦年限>50年),向四周的农地和林地逐渐扩散减小,最后到河道以及湿地

增加,由于河道和湿地具有营养汇集的功能;随土层深度增加,深层土壤有机质以农地和林地为中心向工业区和生活区、河道和湿地四周扩散逐渐减少。

4 结论

本文评估了崇明岛的土壤酶活性以及有机质的空间变化规律,并运用半变异函数和Moran's I函数来研究土壤酶空间变异特征以及异性变异趋势。从分析结果推断,崇明岛不同土地利用类型下土壤酶活性以及有机质的空间演化规律为:工业用地及生活用地→农业用地→林地→河道用地→湿地,呈逐渐减小扩散的趋势。湿地随土地利用方式变化反向揭示崇明冲积岛屿的土壤质量演化过程。上海世博会以及轨道交通的开通,导致更多农田和林地被开发,崇明岛人口以及机动车辆的增多加大了生态环境压力,也可能引起土壤质量的不良发展,应当引起足够的重视。因此,合理科学的利用和管理土地对于提高土壤质量和维持岛屿的生态环境质量具有重要意义。

参考文献:

- [1] Max M C, Wood M, Jarvis S C. A microplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33:1633-1640.
- [2] 高扬,毛亮,周培,等. Cd、Pb污染下植物生长对土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(3):339-344.
- GAO Yang, MAO Liang, ZHOU Pei, et al. Effect of plant growth on soil enzyme activity and microbe community structure under Cd and Pb stress[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46(3):339-345.
- [3] Gao Y, Zhou P, Mao L, et al. Assessment of effects of heavy metals combined pollution on soil enzyme activities and microbial community structure: Modified ecological dose-response model and PCR-RAPD[J].

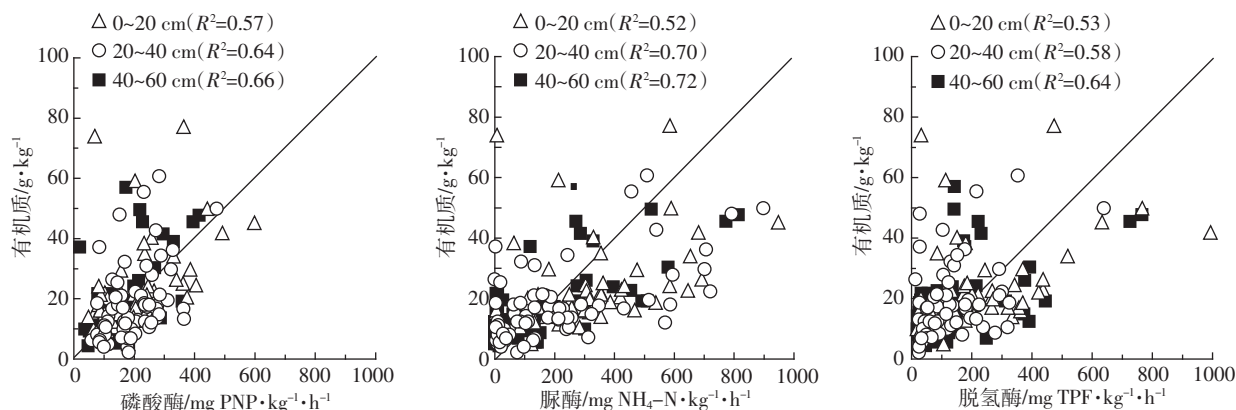


图4 土壤有机质与土壤酶活性相关关系

Figure 4 Relationship of soil organic matter and soil enzymes

- Environmental Earth Science*, 2010, 60: 603–612.
- [4] Yao X H, Min H, Lv H Z, et al. Influence of acetamiprid on soil enzymatic activities and respiration[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42: 120–126.
- [5] Gao Y, Zhu B, Zhou P, et al. Effects of vegetation cover on phosphorus loss from a hillslope cropland of purple soil under simulated rainfall: A case study in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009: 263–273.
- [6] Acosta-Martínez V, Acosta-Mercado D, Sotomayor-Ramírez D L, et al. Microbial communities and enzymatic activities under different management in semiarid soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 38: 249–260.
- [7] Sudipta T, Ashis C, Kalyan C, et al. Enzyme activities and microbial biomass in coastal soils of India[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 2840–2848.
- [8] 万忠梅, 宋长春. 三江平原不同类型湿地土壤酶活性及其与营养环境的关系[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(5): 158–161.
- WAN Zhong-mei, SONG Chang-chun. Soil enzyme activity and its relationship with the soil nutrient environment of different types wetland in Sanjiang Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5): 158–161.
- [9] 黄云凤, 高扬, 毛亮, 等. Cd、Pb单一及复合污染下土壤酶生态抑制效应及生态修复基准研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11): 2258–2264.
- HUANG Yun-feng, GAO Yang, MAO Liang, et al. The ecological inhibition effect of soil enzyme activity and ecological restoration baseline under Cd and Pb single and combined pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2258–2264.
- [10] 张锋, 郑粉莉, 安韶山. 近100年植被破坏加速侵蚀下土壤养分和酶活性动态变化研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(4): 666–672.
- ZHANG Feng, ZHENG Fen-li, AN Shao-shan. Dynamic changes of soil nutrient and enzyme activities under accelerated soil erosion conditions caused by deforestation during the past 100 years[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4): 666–672.
- [11] 蒲小鹏, 李春荣, 白小明, 等. 不同生长年限的草坪土壤酶活性研究[J]. *甘肃农业大学学报*, 2008, 4: 121–123.
- PU Xiao-peng, LI Chun-rong, BAI Xiao-ming, et al. A preliminary research on soil enzymatic activities in turfs in different growth years[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2008, 4: 121–123.
- [12] Haraguchi A, Hisaya K. Decomposition of organic matter in peat soil in a minerotrophic[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2002, 38: 89–95.
- [13] Gao Y, Zhou P, Mao L, et al. Spatial characteristics of soil enzyme activities and microbial community structure under different land uses in Chongming Island, China: Geostatistical modelling and PCR-RAPD method[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408: 3251–3260.
- [14] Xu S, Tao S. Coregionalization analysis of heavy metals in the surface soil of Inner Mongolia[J]. *Sci Total Environ*, 2004, 320: 73–87.
- [15] McGrath D, Zhang C H, Carton T O. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland[J]. *Environ Pollut*, 2004, 127: 239–248.
- [16] 王铁宇, 罗维, 吕永龙, 等. 官厅水库周边土壤重金属空间变异特征及风险分析[J]. *环境科学*, 2007, 28(2): 225–231.
- WANG Tie-yu, LUO Wei, LÜ Yong-long, et al. Spatial variation and eco-environmental risk of heavy metals in soil surrounding Guanting Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(2): 225–231.
- [17] Gao Y, Zhou P, Miao C Y, et al. Assessment of heavy metal pollution of industrial soils in Shanghai by Multivariate Analysis, China[J]. *Risk and Reliability Management*, 2008: 486–492.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- GUAN Song-yin. Soil enzyme and its analysis method[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [19] 劳家柱. 土壤农化分析手册[M]. 北京: 农业出版社, 1998: 20–213, 229–275.
- LAO Jia-zhu. Agricultural soil chemical analysis manual[M]. Beijing: Agricultural Press, 1998: 20–213, 229–275.
- [20] Isaaks E H, Srivastava R M. An introduction to applied geostatistics [M]. New York: Oxford University Press, 1989.
- [21] 侯家儒, 黄竞先. 地质统计学的理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- HOU Jing-ru, HUANG Jing-xian. Geological statistics theory and method[M]. Beijing: Geological Press, 1990.
- [22] 刘春生, 曹正梅, 李红光. 不同培肥措施对潮土酶活性影响的研究[J]. *山东农业大学学报*, 1998, 19(3): 12–15.
- LIU Chun-sheng, CAO Zheng-mei, LI Hong-guang. Effects of different fertilizer measures on enzyme activities in Chao Soil[J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1998, 19(3): 12–15.
- [23] 高秀君, 张仁陟, 杨招弟. 不同耕作方式对旱地土壤酶活性动态的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39(5): 1012–1016.
- GAO Xiu-jun, ZHANG Ren-zhi, YANG Zhao-di. Effects of different tillage practices on the dynamics of soil enzyme activities in dryland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(5): 1012–1016.
- [24] 王鸿斌, 王洪英, 王金荣, 等. 不同耕作方式对黑土结构性的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2005, 27(6): 658–662.
- WANG Hong-bin, WANG Hong-ying, XU Jin-rong, et al. Effect of different tillages on soil construction properties of black soil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2005, 27(6): 658–662.
- [25] 刘久俊, 方升佐, 谢宝东, 等. 生物覆盖对杨树人工林根际土壤微生物、酶活性及林木生长的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(6): 1204–1210.
- LIU Jiu-jun, FANG Sheng-zuo, XIE Bao-dong, et al. Effects of bio-mulching on rhizosphere soil microbial population, enzyme activity and tree growth in poplar plantation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1204–1210.
- [26] 高扬, 朱波, 王玉宽, 等. 自然降雨和人工降雨条件下紫色土坡地磷素迁移比较[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(5): 34–37.
- GAO Yang, ZHU Bo, WANG Yu-kuan, et al. Phosphorus transportation from slope cropland of purple soil at natural and stimulated rainfall events[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(5): 34–37.
- [27] Gao Y, Zhu B, Zhou P, et al. Bioavailable phosphorus transport from a hillslope cropland of purple soil under natural and simulated rainfall[J]. *Environmental Monitor and Assessment*, 2010, 171: 539–550.
- [28] 高扬, 朱波, 汪涛, 等. 人工模拟降雨条件下紫色土坡地生物可利用磷的输出[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(6): 542–547.
- GAO Yang, ZHU Bo, WANG Tao, et al. Purple soil sloping land bio-available phosphorus transported out under the condition of artificial simulated rainfall[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(6): 542–547.