

质量指数法表征不同处理模式对滨海盐碱地土壤质量的影响*

单奇华^{1,2} 张建锋^{1†} 唐华军³ 阮伟建³ 沈立铭⁴ 陈光才¹

(1 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400)

(2 宜兴市林业指导站, 江苏宜兴 214206)

(3 余姚市泗门镇农业农村办, 浙江余姚 315470)

(4 余姚市林业特产技术推广总站, 浙江余姚 315400)

摘要 以自然演化模式、林业治理模式和农业治理模式的土壤为研究对象, 运用土壤单质量指数 (Soil single quality index, SSQI) 和土壤综合质量指数 (Soil comprehensive quality index, SCQI) 法, 研究了滨海盐碱地土壤质量的动态变化规律。结果显示: 根据土壤单质量指数, 研究区土壤容重、总孔隙度、通气度和含盐量总体属于优、良级水平, pH、全磷、有效磷和速效钾属于中级水平; 而质地、有机质、全氮和微生物生物量属于中、差级水平。农业和林业治理模式能有效地优化滨海盐碱地土壤的含盐量、有机质、全氮、全磷、有效磷和速效钾指数。根据土壤综合质量指数, 研究区土壤综合质量指数平均为 1.2 ± 0.1 (中级水平), 土壤质量一般, 不利于植物生长。其中农业治理模式的土壤综合质量指数为 1.24 ± 0.11 , 林业治理模式为 1.2 ± 0.1 , 自然演化模式为 1.14 ± 0.09 。土壤综合质量指数显示不同处理模式的土壤质量有一定的差异, 这一差异的稳定性较高, 但未达统计分析的显著性水平。人为干扰如农业和林业治理模式是滨海盐碱地土壤质量在短期内产生时空变异的主要诱因, 加速了滨海盐碱地土壤质量的演化进程。

关键词 盐碱地; 质量指数; 内梅罗; 时空变异; 余姚

中图分类号 S156.4; S718.5 **文献标识码** A

滨海盐碱地是在海洋和陆地的相互作用下由大量泥沙沉积而形成的连接陆地和海洋的缓冲地带, 地貌以平原、河口三角洲和滩涂为主, 绝大多数属泥质海岸带, 土壤类型主要为滨海盐土类、潮土类和水稻土类。由于受到海风和海浪的严重侵蚀, 滨海盐碱地土壤盐碱化严重, 以低等动植物为主^[1]。我国是滨海盐碱地资源丰富的国家, 大陆海岸线长达 18 000 km, 北起鸭绿江口, 南至北仑河口, 范围涉及 150 余个县, 总面积 2 270 km²^[2]。但由于受到气候、地理和环境因素的制约, 滨海盐碱地资源没有得到充分利用。国内科研人员在滨海盐碱地的地形地貌, 盐分组成和空间分布特征, 养分特征和生物特性等基础和理论研究^[3-5], 盐碱地修复技术开发^[6-8], 盐碱地复垦效益评估^[9]等方面做了大量的工作。当前治理盐碱地的主导理论为陈恩风教授等提出的“以排水为基础, 培肥为根本”。常

用的治理模式主要有自然演化模式、林业治理模式^[10]和农业治理模式。自然演化模式投资最少, 但耗时最长, 不能满足当前国情需求。林业治理模式是一种新兴的生态治理盐碱地的综合措施, 兼具生态、经济和社会三效益, 被认为是治理滨海盐碱地的最理想模式, 并被广泛应用。农业治理模式是一种传统的盐碱地治理模式, 主要包括农业耕作措施、农业植被措施和农业养殖措施等^[11-12]。从利用过程来看, 农业治理模式是继自然演化模式和林业治理模式之后的盐碱地进一步优化和利用过程。

土壤质量 (Soil quality) 的定义是一定生态系统下土壤维持生物生产力, 保持环境质量和促进植物和动物健康的能力^[13-14]。土壤质量是一个综合度量 (包含土壤肥力质量、土壤环境质量和土壤健康质量)^[15]。土壤质量的概念是在 20 世纪 90 年代,

* 林业公益性行业科研专项 (201104055)、浙江省林业科研项目 (08A02)、林业科技支撑计划项目 (2009BADB2B0304 - 2 和 2012BAJ24B0504) 资助

† 通讯作者, E-mail: zhangk126@126.com

作者简介: 单奇华 (1980—), 男, 江苏宜兴人, 博士, 主要从事退化土地生态修复研究。E-mail: sqhua1980@sina.com

收稿日期: 2011-12-25; 收到修改稿日期: 2012-05-01

人口增长、粮食紧缺、土地资源退化、环境污染的背景下,继水质量和大气质量之后提出的一个新概念^[16]。这一概念有效地提高了公众对土壤这一不可再生资源的认识度,强调了土壤、水和大气同等重要性以及相互依赖性。当前,学术界对土壤质量的功能和定义有了较广泛的共识,但对于土壤质量评价指标的标准化分析、合理选取和量化表达^[17-18],以及对于土壤质量的评价模型,快速预测和预报技术等方面还处于争论和开发阶段^[19]。在今后一段时期内土壤质量仍将是土壤学、林学、农学、生态学和环境学等众多学科交叉领域的研究热点和难点^[20]。本文运用土壤质量指数法,以滨海盐碱地为研究对象,研究了在自然演化模式、林业治理模式和农业治理模式下滨海盐碱地土壤质量的动态变化规律,为滨海盐碱地的生态改良和高效利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省余姚市滨海滩涂盐碱地(30°13'30"N,121°0'40"E),约3.5 km长的地段。余姚市地处宁绍平原中心,总体地貌呈南部低山丘陵,中部水网平原和北部滨海平原分布(山地丘陵、平原(含海涂)、水域(含海域)面积比例为53:29:18),总面积1 527 km²。气候属于北亚热带季风气候区,四季分明,年平均气温16.2℃左右,日照1 792 h左右,相对湿度约78%,全年无霜期230 d左右。自然灾害以旱、涝和台风为主,一般每年2~3次涝灾,1~2次台风,每年都有不同程度的旱情发生^[21]。研究区土壤偏强碱性,含盐量较高,根据土壤质地可归为粗粉砂涂或泥涂^[1]。研究区滩涂擦荒地土壤(造林前)的一些基本化学性质见表1。研究区现存的土地类型有荒地、林地和农田。荒地分布在海岸线至内陆1.5~3 km的范围内,主要有芦苇(*Phragmites australis*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)和碱蓬(*Suaeda glauca*)等耐盐野生植物。农田分布在距海岸线1.5~3 km开外的内陆,以种植榨菜(*Brassica juncea* var. *tumida*)为主。林地位于荒地和农田之间,为新营建的防护林带,营建时间为2008年10月~2009年2月。林带宽约30 m,长约3.5 km,应用物理措施(如开沟、整地和客土)、化学措施(如施用化学酸性肥料)和生物措施(如套种田菁(*Sesbania cannabina*)、大麦(*Hordeum vulgare*)、野豌豆(*Vicia*

sepium)和天蓝苜蓿(*Medicago lupulina*)等综合改良土壤。在改良后的土壤上营造多树种混交,多层次复合,建成以乔木为主体,搭配灌草的混交林带。主要树种为意杨(*Populus euramevicana* cv. 'I-214'),栎树(*Koelreuteria paniculata*)、国槐(*Sophora japonica*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、无患子(*Sapindus mukurossi*)、绒毛白蜡(*Fraxinus velutina*)、金丝垂柳(*Salix X aureo-pendula*)、中山杉(*Ascendens mucronatum*)、红叶石楠(*Photinia serrulata*)、珊瑚朴(*Celtis julianae*)、夹竹桃(*Nerium oleander*)、海滨木槿(*Hibiscus hamabo*)。试验期内试验点未见灾害性气候报道。

表1 研究区土壤背景值

Table 1 Background values of the soil in the study area

含盐量 Salt content (g kg ⁻¹)	pH	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)
7.4 (0.31)	8.48 (0.38)	5.2 (0.14)	0.31 (0.04)	7.9 (2.4)	205 (24.04)

注:数值表示方法为平均值(标准差) Note: Values displayed as means (standard deviation)

1.2 试验设计

以研究区现存的土地类型为基础,在空间上将研究区土地分为自然演化模式(1)、林业治理模式(2)和农业治理模式(3),时间上分三次,分别为2009年10月(i)、2010年5月(ii)和2010年10月(iii)(表2)分别采集并分析三种典型治理模式的土壤质量指标。对指标进行标准化,用土壤单质

表2 土壤样品采集设计及其对应质量指数符号

Table 2 Designing for soil sampling and their corresponding quality index (SSQI/ SCQI) signs

治理模式 Management modes	时间 Time		
	2009-10(i)	2010-05(ii)	2010-10(iii)
自然演化模式 Natural evolution-based management mode (1)	SSQI _{i,1} SCQI _{i,1}	SSQI _{ii,1} SCQI _{ii,1}	SSQI _{iii,1} SCQI _{iii,1}
林业治理模式 Forestry-based management mode (2)	SSQI _{i,2} SCQI _{i,2}	SSQI _{ii,2} SCQI _{ii,2}	SSQI _{iii,2} SCQI _{iii,2}
农业治理模式 Agriculture-based management mode (3)	SSQI _{i,3} SCQI _{i,3}	SSQI _{ii,3} SCQI _{ii,3}	SSQI _{iii,3} SCQI _{iii,3}

量指数 (Soil single quality index, SSQI) 和土壤综合质量指数 (Soil comprehensive quality index, SCQI) 分别表征土壤质量状况。土壤样品采集设计及其对应 SSQI 和 SCQI 的符号表示见表 2。由于各种模式形成的时间不同,造成土壤背景值不统一,为消除这一干扰,本文重点比较了滨海盐碱地土壤质量指数在空间和时间上的动态变化过程,以揭示不同处理模式对滨海盐碱地土壤质量的影响。

1.3 土壤样品采集、处理与测定

2009 年 10 月 (农历秋季,当地气候稳定,温湿度适宜)、2010 年 5 月 (农历春季,入梅以前,气候稳定,温湿度适宜) 和 2010 年 10 月三次在研究区分别采集自然演化模式、林业治理模式和农业治理模式的土壤样品。每一样点 (样点区域长宽约为 200 m × 30 m) 以蛇形布点法,按照随机、等量和多点 (本试验取 5 点) 混合的原则采集表层 (0 ~ 20 cm) 土壤样品,每种模式三次重复。同时用环刀取土,测定土壤容重、总孔隙度和通气度^[22]。土壤样品在实验室自然风干,剔除细根,研磨并分别过尼龙筛 (孔径: 2 mm、1 mm 和 0.25 mm) 备用。土壤样品测定方法: pH 用 25 ml 去离子水浸提过 2 mm 筛的风干土壤样品 (10 g), pH 计法; 含盐量用电导率法; 机械组成用过 2 mm 筛土样,比重计法; 有机质 (Organic matter, OM) 用重铬酸钾氧化-外加热法; 全氮 (Total nitrogen, TN) 用半微量凯氏法; 全磷 (Total phosphorus, TP) 用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法; 有效磷 (Available phosphorus, AP) 用碳酸氢钠浸提钼蓝比色法; 速效钾 (Available potassium, AK) 用 1 mol L⁻¹ 乙酸铵浸提-火焰光度法^[22]; 微生物生物量 (Microbial biomass, C_{mic}) 用氯仿熏蒸培养法。用标准土样 (GBW07403 (GSS-3)) 校准土壤化学元素测定值, 标准土样购自国家标准物质中心。

1.4 数据处理

1.4.1 土壤质量指标分级标准 参考曹志洪等^[13]、Li 等^[23]、单奇华等^[24]、孙向阳^[25] 和阚文杰等^[26] 的研究结果, 确定土壤质量指标分级标准 (表 3)。

1.4.2 土壤单质量指数 (SSQI) 计算 土壤单质量指数的计算过程即是土壤质量指标的标准化过程, 其原理是依据土壤指标与植物生长的关系。在标准化过程中, 指标与植物生长的关系曲线通常可分为三种类型: “S”形、反“S”形和抛物线形^[13]。

满足“S”形曲线的指标标准化公式:

$$C_i \leq X_{\min}, \quad P_i = C_i / X_{\min} \quad (1)$$

表 3 土壤质量指标分级标准

Table 3 Gradation standard of indicators for soil quality assessment

土壤指标 Soil indicators	X_{\min}	X_{mid}	X_{\max}	X_o
容重 Bulk density (g cm ⁻³)	1.25	1.35	1.45	1.14 ~ 1.25
总孔隙度 Total porosity (%) (≤50)	20	35	50	50% ~ 60%
(≥60)	60	70	80	
通气度				
Aeration porosity (%) (≤10)	3	6	10	10% ~ 15%
(≥15)	15	25	30	
pH (≤6.5)	4.5	5.5	6.5	6.5 ~ 7.0
(≥7.0)	7.0	8.0	9.0	
含盐量 Salt content (g kg ⁻¹)	0.5	1.5	4	<0.5
有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	10	20	30	>30
全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	0.75	1	1.5	>1.5
全磷 Total phosphorus (g kg ⁻¹)	0.4	0.6	0.8	>0.8
有效磷 Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	5	10	20	>20
速效钾 Available potassium (mg kg ⁻¹)	50	100	150	>150
微生物生物量 Microbial biomass (mg kg ⁻¹)	70	350	700	>700

注: X_{\min} , X_{mid} , X_{\max} 和 X_o 分别为指标标准化下限、中值、上限和最优区间 Note: X_{\min} , X_{mid} , X_{\max} and X_o stands for the lower threshold, median, upper threshold and optimum, respectively, of the criteria of the indices.

$$X_{\min} < C_i \leq X_{\text{mid}},$$

$$P_i = 1 + (C_i - X_{\min}) / (X_{\text{mid}} - X_{\min}) \quad (2)$$

$$X_{\text{mid}} < C_i \leq X_{\max},$$

$$P_i = 2 + (C_i - X_{\text{mid}}) / (X_{\max} - X_{\text{mid}}) \quad (3)$$

$$C_i \geq X_{\max}, \quad P_i = 3 \quad (4)$$

满足反“S”形曲线的指标标准化公式:

$$C_i \geq X_{\max}, \quad P_i = X_{\max} / C_i \quad (5)$$

$$X_{\text{mid}} \leq C_i < X_{\max},$$

$$P_i = 1 + (X_{\max} - C_i) / (X_{\max} - X_{\text{mid}}) \quad (6)$$

$$X_{\min} \leq C_i < X_{\text{mid}},$$

$$P_i = 2 + (X_{\text{mid}} - C_i) / (X_{\text{mid}} - X_{\min}) \quad (7)$$

$$C_i \leq X_{\min} \quad P_i = 3 \quad (8)$$

满足抛物线形曲线的指标标准化: 将抛物线形曲线顶端设为最优区间 (X_o), 最优区间内指标的标准化公式:

$$C_i = (X_o), \quad P_i = 3 \quad (9)$$

最优区间左侧指标的标准化适用“S”形曲线的式(1)、式(2)和式(3),最优区间右侧指标的标准化适用反“S”形曲线的式(5)、式(6)和式(7)。

以上各式中, P_i 为土壤单质量指数(SSQI); C_i 为指标实测值; X 为指标分级标准(表3)。本研究中有有机质、全氮、全磷、有效磷、速效钾和微生物生物量指标可归为“S”形曲线,适用式(1)、式(2)、式(3)和式(4)进行标准化。含盐量指标可归为反“S”形曲线,适用式(5)、式(6)、式(7)和式(8)进行标准化。容重、总孔隙度、通气度和pH指标可归为抛物线形曲线,适用式(1)~式(9)进行标准化。质地的分级标准和标准化结果为壤土类(砂质壤土、壤土、粉(砂)质壤土); $P_i = 3$,黏壤土类(砂质黏壤土、黏壤土、粉(砂)质黏壤土)、粉土: $P_i = 2$,砂土类(砂土、壤质砂土)、黏土类(砂质黏土、壤质黏土、粉砂质黏土、黏土、重黏土); $P_i = 1$ ^[26-27]。

1.4.3 土壤综合质量指数(SCQI)计算 用改进的内梅罗(Nemoro)综合指数法计算土壤综合质量指数^[23-24,28],计算公式略。

质量指数评价分级:SSQI/SCQI ≥ 2.0 优,2.0~1.5良,1.5~1.0中,<1.0差。

方差分析用SAS8.0,图像处理用Origin7.0和Excel软件。

2 结果与分析

2.1 滨海盐碱地土壤单质量指数的动态变化

在外界环境影响下,土壤质量的演化过程由各项指标的演化决定,并共同表征。在人类时间尺度上,通常认为大多数土壤的物理指标不易受到外界的影响而改变,属于稳定性指标。本试验中由于土壤质地、容重、总孔隙度和通气度短期内不易改变,因此将这四个物理指标视为研究期内的常量,没有对其单质量指数作动态分析,而对土壤的化学和生物学单质量指数以及土壤综合质量指数作了动态分析。

滨海盐碱地土壤容重、总孔隙度和通气度单质量指数绝大多数高于2.0,属于优一级。不同处理模式间各指数均表现出林业治理模式最高,自然演化模式次之,农业治理模式最低的趋势,但在统计学上无显著性差异。表明林业措施对滨海盐碱地土壤的物理指标有改良作用,但由于物理指标的稳定性特征,使得改良效果在短期内不明显。各模式土壤质地指数均较低,属于差一级水平,且相对稳

定。质地较容重、总孔隙度和通气度更具有稳定性(表4)。

表4 土壤物理性单质量指数的变化规律

Table 4 Laws of the variation of SSQI of soil physical properties

治理模式 Management modes	单质量指数 Single quality index			
	容重 Bulk density	总孔隙度 Total porosity	通气度 Aeration porosity (美国制)	质地 Texture
自然演化模式 Natural evolution-based management mode	2.13 (0.78)	2.74 (0.26)	2.56 (0.74)	1.00
林业治理模式 Forestry-based management mode	2.83 (0.29)	2.81 (0.14)	2.64 (0.31)	1.00
农业治理模式 Agriculture-based management mode	2.04 (0.92)	2.51 (0.14)	1.67 (1.0)	1.00

含盐量和酸碱度是滨海盐碱地土壤区别于其他类型土壤的两项指示性指标,也是影响该地植物生长的最重要的障碍性指标。研究表明:整个研究区土壤含盐量指数变幅为1.36~3.00。其中自然演化模式平均为 2.04 ± 0.59 ,林业治理模式平均为 2.54 ± 0.69 ,农业治理模式平均为 2.59 ± 0.48 ,研究期内不同处理土壤含盐量指数均处于优级,盐害作用不明显。从平均值和指数变化曲线看(图1),林业和农业治理模式的土壤含盐量指数优于自然演化模式,但没有达到显著性水平。此外,在林业和农业治理模式下,土壤含盐量指数在时间序列上产生显著性差异(ANOVA, $p < 0.01$),多重比较结果为 $SSQI_{ii,2/3(salt)} = SSQI_{iii,2/3(salt)} > SSQI_{i,2/3(salt)}$ 。而自然演化模式土壤的含盐量在时间序列上没有显著性差异。表明在相同的自然条件下,林业和农业治理模式明显有利于滨海盐碱地土壤的脱盐过程,这为该类退化土地的生态恢复找到依据。

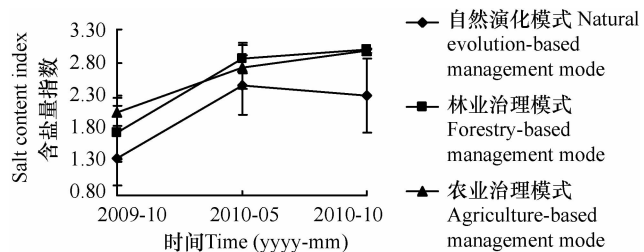


图1 不同处理模式土壤含盐量指数动态变化

Fig. 1 Dynamics of $SSQI_{(salt)}$ as a function of mode of management

整个研究区土壤 pH 指数变幅为 1.27 ~ 1.58。其中自然演化模式平均为 1.55 ± 0.03 ; 林业治理模式平均为 1.33 ± 0.06 ; 农业治理模式平均为 1.48 ± 0.08 。不同处理模式土壤 pH 指数无显著性差异 (图 2), 在时间序列上亦无显著性差异。滨海盐碱地土壤酸碱性和在研究期内保持稳定, 受外界干扰影响较小。需要进一步研究使该地区土壤酸碱度指数保持在中等水平的影响因子。

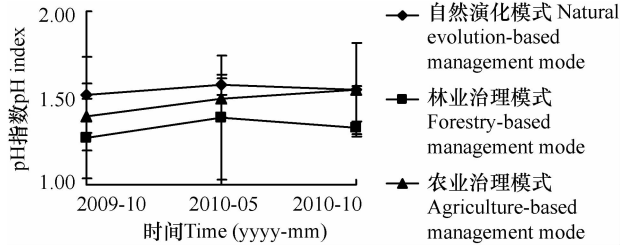


图 2 不同处理模式土壤 pH 指数动态变化

Fig. 2 Dynamics of $SSQI_{(pH)}$ as a function of mode of management

整个研究区土壤有机质指数变幅为 0.47 ~ 1.31, 全氮指数变幅为 0.46 ~ 1.34, 研究区土壤有机质和全氮都属于中、差级水平 (图 3、图 4)。其中自然演化模式的有机质和全氮指数平均值分别为 0.63 ± 0.15 和 0.56 ± 0.09 ; 林业治理模式分别为 0.74 ± 0.20 和 0.61 ± 0.06 ; 农业治理模式分别为 1.21 ± 0.12 和 1.22 ± 0.17 。研究区土壤有机质与全氮有着近似的动态变化特征。不同模式间土壤有机质和全氮指数有显著性差异 (ANOVA, $p < 0.01$), 多重比较结果为 $SSQI_{i/iii,3(OM/TN)} > SSQI_{i/iii,2(OM/TN)} = SSQI_{i/iii,1(OM/TN)}$, 表明农业治理模式有效地提高了土壤有机质和全氮指数, 而林业治理措施对土壤有机质和全氮指数有逐渐优化的趋势, 但还未达到显著性水平。三种治理模式的土壤有机质和全氮指数在时间序列上均无显著性差异, 时间动力学特征不明显, 表明试验期内各治理模式的土壤有机质和全氮含量均保持动态稳定, 引起研究区短期内土壤有机质和全氮指数空间变化的主要原因是人为干扰措施如农业和林业治理措施。

整个研究区土壤全磷指数变幅为 1.45 ~ 2.37。其中自然演化模式平均值为 1.69 ± 1.05 ; 林业治理模式平均值为 1.69 ± 1.07 ; 农业治理模式平均值为 2.24 ± 1.22 。整个研究区有效磷指数变幅为 0.81 ~ 2.44。其中自然演化模式平均值为 1.13 ± 0.67 ; 林业治理模式分别为和 1.28 ± 0.88 ; 农业治理模式分别为 2.31 ± 0.99 。农业治理模式土壤的全磷和有效磷指数均为优级, 而其他治理模式土壤的全磷指

数多为良级, 有效磷指数多为中、差级 (图 5、图 6)。方差分析显示: 2010 年 5 月, 不同模式间土壤全磷指数有显著性差异, (ANOVA, $p < 0.01$, 多重比较结果为 $SSQI_{ii,3(TP)} > SSQI_{ii,2(TP)} = SSQI_{ii,1(TP)}$), 表明

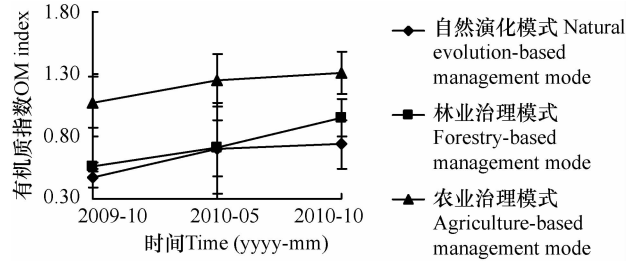


图 3 不同处理模式土壤有机质指数动态变化

Fig. 3 Dynamics of $SSQI_{(OM)}$ as a function of mode of management

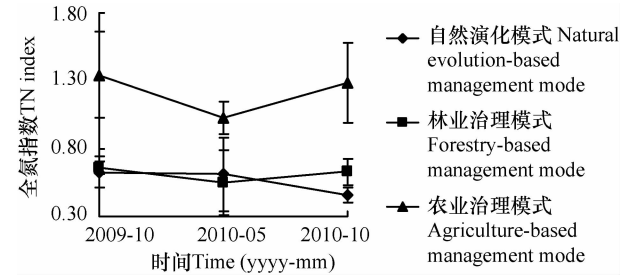


图 4 不同处理模式土壤全氮指数动态变化

Fig. 4 Dynamics of $SSQI_{(TN)}$ as a function of mode of management

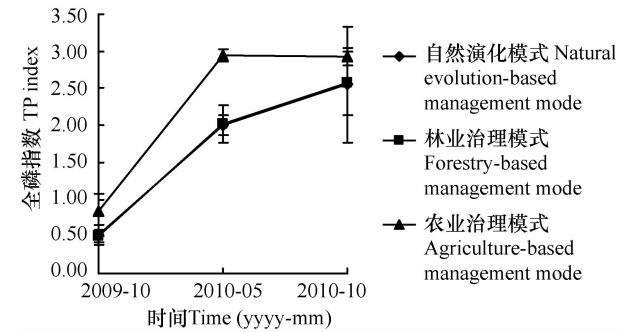


图 5 不同处理模式土壤全磷指数动态变化

Fig. 5 Dynamics of $SSQI_{(TP)}$ as a function of mode of management

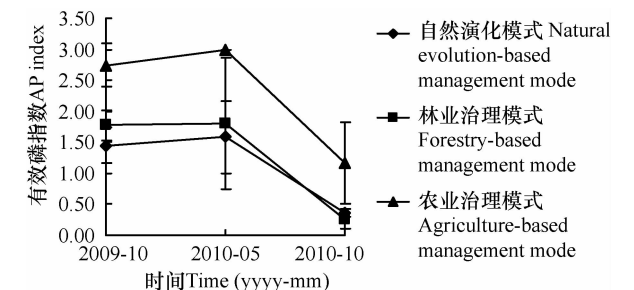


图 6 不同处理模式土壤有效磷指数动态变化

Fig. 6 Dynamics of $SSQI_{(AP)}$ as a function of mode of management

农业治理模式土壤全磷高于林业和自然演化模式。三种治理模式的土壤全磷在时间序列上均有显著性差异 (ANOVA, $p < 0.01$, 多重比较结果为 $SSQI_{iii,1/2/3(TP)} = SSQI_{ii,1/2/3(TP)} > SSQI_{i,1/2/3(TP)}$), 均表现出显著升高的趋势。2009年10月, 不同模式间土壤有效磷指数有显著性差异, (ANOVA, $p < 0.01$, 多重比较结果为 $SSQI_{i,3(TP)} > SSQI_{i,2(TP)} = SSQI_{i,1(TP)}$), 与全磷一致, 农业治理模式土壤有效磷高于林业和自然演化模式。自然演化模式 (ANOVA, $p < 0.05$) 和农业治理模式 (ANOVA, $p < 0.01$) 的土壤有效磷在时间序列上均有显著性差异, 多重比较结果为 $SSQI_{i,1/3(AP)} = SSQI_{ii,1/3(AP)} > SSQI_{iii,1/3(AP)}$, 均表现出显著降低的趋势。研究区土壤全磷和有效磷在时间序列上有着相反的变化趋势。

整个研究区土壤速效钾指数变幅为 1.08 ~ 3.00。其中自然演化模式平均为 2.91 ± 0.16 ; 林业治理模式平均为 1.77 ± 0.23 ; 农业治理模式平均为 1.12 ± 0.05 。自然演化模式处于优级水平, 林业治理模式处于良级水平, 而农业治理模式均处于中级水平。方差分析显示, 各时期不同处理模式间土壤速效钾指数均有显著性差异 (ANOVA, $p < 0.01$), 多重比较结果为 $SSQI_{i/ii/iii,1(AK)} > SSQI_{i/ii/iii,2(AK)} = SSQI_{i/ii/iii,3(AK)}$ 。在时间序列上, 土壤速效钾指数没有显著性差异 (图 7)。

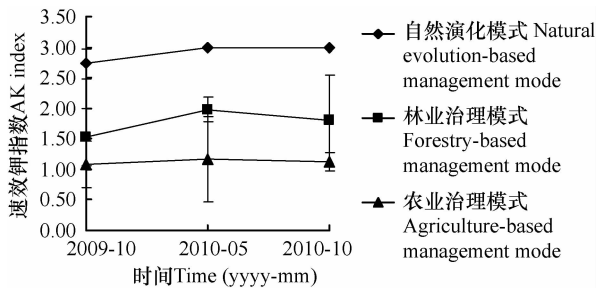


图 7 不同处理模式土壤速效钾指数动态变化

Fig. 7 Dynamics of $SSQI_{(AK)}$ as a function of mode of management

整个研究区土壤微生物生物量指数变幅为 0.96 ~ 1.88。其中自然演化模式平均为 1.38 ± 0.42 ; 林业治理模式平均为 1.69 ± 0.22 ; 农业治理模式平均为 1.66 ± 0.16 。自然演化模式土壤微生物生物量指数属于中级水平, 林业和农业治理模式的土壤微生物生物量指数为良级水平。方差分析显示, 在空间和时间序列上土壤微生物生物量指数均无显著性差异 (图 8)。

2.2 滨海盐碱地土壤综合质量指数的动态变化

用改进的内梅罗公式, 应用常量 (土壤质地、容

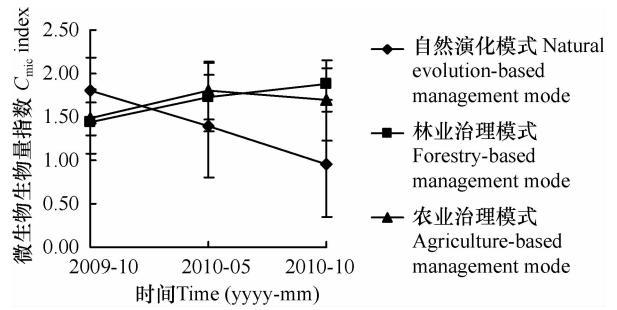


图 8 不同处理模式土壤 C_{mic} 动态变化

Fig. 8 Dynamics of $SSQI_{(Cmic)}$ as a function of mode of management

重、总孔隙度和通气度指数) 和变量 (土壤含盐量、pH、有机质、全氮、全磷、有效磷、速效钾、微生物生物量), 计算了滨海盐碱地不同处理模式下土壤的综合质量指数。

整个研究区土壤综合质量指数变幅为 1.06 ~ 1.34, 平均为 1.18 ± 0.10 。根据评价分级, 研究区土壤综合质量指数均处于中级水平, 土壤质量一般, 不利于植物生长。其中, 自然演化模式平均为 1.14 ± 0.09 , 林业治理模式平均为 1.17 ± 0.1 , 农业治理模式平均为 1.24 ± 0.11 。从平均值和指数曲线看, 不同处理的土壤综合质量指数表现为农田治理模式最高, 林业治理模式次之, 自然模式最低, 但统计分析未达到显著性水平。同样, 在时间序列上, 土壤综合质量指数有细微差异, 但统计分析未发现显著性差异。与土壤单质量指数不同的是, 不同处理模式的土壤综合质量指数在时间序列上有较为一致的变化趋势, 在空间上有较为稳定的差异趋势, 显示出较高的表征稳定性 (图 9)。

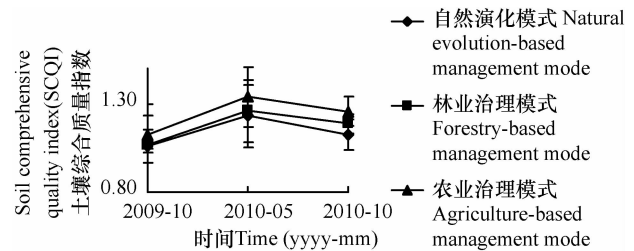


图 9 不同处理模式土壤综合质量指数动态变化

Fig. 9 Dynamics of $SCQI$ as a function of mode of management

3 结论与讨论

根据土壤单质量指数, 研究区土壤容重、总孔隙度、通气度和含盐量总体属于优良级, pH 总体属于中级, 全磷、有效磷和速效钾总体属于中级以上水平, 而质地、有机质、全氮和微生物生物量总体属

于中、差级。根据土壤综合质量指数,研究区土壤综合质量为中级,土壤质量一般,不利于植物生长。

不同处理模式对滨海盐碱地土壤质量的变化产生影响,主要表现为对土壤的含盐量、有机质、全氮、全磷、有效磷的速效钾指数产生影响。滨海盐碱地在三种治理模式下均发生脱盐过程,而林业治理模式和农业治理模式有效地加速了这一过程,优化了含盐量指数。土壤有机质、全氮、全磷和有效磷指数在空间分布上有共同的特征,均表现为农业治理模式最高,林业治理模式和自然演化模式次之。土壤速效钾空间分布与其他指标有着相反的特征,即自然演化模式最高,林业治理模式和农业治理模式次之。农业生产中的施肥可能是导致农业治理模式土壤有机质、全氮、全磷和有效磷高于其他模式的主要原因,而速效钾空间分布的异常及其影响因素还需进一步研究证实。农业治理模式和林业治理模式是滨海盐碱地土壤质量产生时空变异的诱因。

滨海盐碱地其他指标如土壤容重、总孔隙度、通气度和质地均保持稳定,在研究期内不同处理模式间各指数无显著性差异。土壤 pH 和微生物生物量指数在研究期内空间和时间上亦无显著性变化。研究区土壤含盐量与 pH 没有协同性是一个很特殊的现象,值得深入研究。

不同处理模式土壤综合质量指数的差异小,数量上未达到显著性水平,但差异趋势稳定,即在多次调研中均表现为农田治理模式最高,林业治理模式次之,自然演化模式最低(图9)。土壤综合质量指数的计算兼用了一些对环境因子不敏感的稳定指标,因此,与土壤单质量指数相比,土壤综合质量指数对土壤质量变化的表征趋于保守,降低了差异的显著性,但提高了结果的准确度、可信度和稳定性。因此,为了突出样点间土壤质量的差异,尤其是为了突出土壤中的限制性因子,同时又要保证结果的可靠性和稳定性,有必要结合使用土壤单质量指数和综合质量指数对土壤质量进行表征。

农业治理模式对土壤的一些敏感指标影响较大。林业治理模式由于建造时间尚短还不具备明显改良滨海盐碱地土壤质量的能力,但从趋势看仍有一定的改良潜力。自然演化模式研究期内土壤单质量指数和综合质量指数基本无变化,土壤质量的变化度可忽略不计。因此,人为干扰如农业和林业治理模式是滨海盐碱地土壤质量在短期内产生时空变异的主要诱因,加速了滨海盐碱地土壤质量的演化进程。

参 考 文 献

- [1] 陆宏,厉仁安. 杭州湾南岸土壤演变及其开发利用研究. 土壤通报, 2009,40(2): 218—220. Lu H, Li R A. Soil evolution on the south of Hangzhou Gulf and its exploiting and utilization (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(2): 218—220
- [2] 李广毅,高国雄,尹忠东. 国内外关于防护林体系结构研究动态综述. 水土保持研究,1995,2(2): 70—78. Li G Y, Gao G X, Yin Z D. Summary on the domestic and foreign dynamic research of protection forest system structure benefit (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 1995, 2(2): 70—78
- [3] 赵秀芳,杨劲松,姚荣江. 基于典范对应分析的苏北滩涂土壤春季盐渍化特征研究. 土壤学报,2010,47(3): 422—427. Zhao X F, Yang J S, Yao R J. Characteristics of soil salinization in mudflat of north Jiangsu Province based on canonical correspondence analysis (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 422—427
- [4] 刘广明,杨劲松,姜艳. 江苏不同滩涂区地下水及土壤的盐分特征研究. 土壤,2005,37(2): 163—168. Liu G M, Yang J S, Jiang Y. Salinity characters of soils and groundwater in typical coastal area in Jiangsu Province (In Chinese). Soils, 2005, 37(2): 163—168
- [5] 吴丽云,曹帮华,黄彦新,等. 滨海盐碱地刺槐臭椿混交林土壤酶活性季节动态研究. 林业科学研究,2010,23(6): 889—894. Wu L Y, Cao B H, Huang Y X, et al. Studies on the seasonal changes of soil enzyme activity in *Robinia pseudoacacia* and *Ailanthus altissima* mixed stands in coastal saline soil (In Chinese). Forest Research, 2010, 23(6): 889—894
- [6] 张建锋,张旭东,周金星,等. 世界盐碱地资源及其改良利用的基本措施. 水土保持研究,2005,12(6): 28—30. Zhang J F, Zhang X D, Zhou J X, et al. World resources of saline soil and main amelioration measures (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(6): 28—30
- [7] 张金龙,王振宇,张清. 开发利用发酵残渣改良盐碱土的研究. 农业环境科学学报,2007,26(增刊): 184—187. Zhang J L, Wang Z Y, Zhang Q. Application of fermented residue in remediation of saline soil (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2007,26(Suppl): 184—187
- [8] Barrett-Lennard E G. Restoration of saline land through revegetation. Agricultural Water Management, 2002, 53(1/3): 213—226
- [9] Yu G, Zhang J Y. Analysis of the impact on ecosystem and environment of marine reclamation—A case study in Jiaozhou Bay. Energy Procedia, 2011(5): 105—111
- [10] 张建锋,宋玉民,邢尚军,等. 盐碱地改良利用与造林技术. 东北林业大学学报,2002,30(6): 124—129. Zhang J F, Song Y M, Xing S J, et al. Saline soil amelioration and forestation techniques (In Chinese). Journal of Northeast Forestry University, 2002, 30(6): 124—129
- [11] 郑必昭. 山西省盐碱地改良利用探讨. 土壤通报,2000, 31(3): 102—103. Zheng B Z. Amelioration and utilization of

- salt land in Shanxi Province (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2000, 31(3): 102—103
- [12] 任崑, 罗廷彬, 王宝军, 等. 新疆生物改良盐碱地效益研究. 干旱地区农业研究, 2004, 22(4): 211—214. Ren W, Luo T B, Wang B J, et al. Biological improvement of saline and alkaline land in Xinjiang (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(4): 211—214
- [13] 曹志洪, 周健民. 中国土壤质量. 北京: 科学出版社, 2008: 45—52. Cao Z H, Zhou J M. Soil quality of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 2008: 45—52
- [14] Wagenet R J, Hutson J S. Soil quality and its dependence and dynamic physical processes. J Environ Qual, 1997, 26(1): 41—48
- [15] 赵其国, 孙波, 张桃林. 土壤质量与持续环境 I. 土壤质量的定义及评价方法. 土壤, 1997, 29(3): 113—120. Zhao Q G, Sun B, Zhang T L. Soil quality and sustainable environment (In Chinese). Soils, 1997, 29(3): 113—120
- [16] 张桃林, 潘剑君, 赵其国. 土壤质量研究进展与方向. 土壤, 1999, 31(1): 1—7. Zhang T L, Pan J J, Zhao Q G. Advance and direction of the soil quality research (In Chinese). Soils, 1999, 31(1): 1—7
- [17] 张华, 张甘霖. 土壤质量指标和评价方法. 土壤, 2001, 33(6): 326—330. Zhang H, Zhang G L. Indicators and methods for assessing soil quality (In Chinese). Soils, 2001, 33(6): 326—330
- [18] 唐玉姝, 魏朝富, 颜廷梅, 等. 土壤质量生物学指标研究进展. 土壤, 2007, 39(2): 157—163. Tang Y S, Wei C F, Yan T M, et al. Biological indicator of soil quality: A review (In Chinese). Soils, 2007, 39(2): 157—163
- [19] 刘占锋, 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—912. 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—912
- [20] 胡亚林, 曾德慧, 范志平, 等. 半干旱区沙质退化草地造林对土壤质量的影响. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2 391—2 397. Hu Y L, Zeng D H, Fan Z P, et al. Effects of degraded sandy grassland afforestation on soil quality in semi-arid area of Northern China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(11): 2 391—2 397
- [21] 沈娜婷, 胡娟娟, 陈高, 等. 余姚市沿海防护林体系建设总体规划的探讨. 华东森林经理, 2010, 24(1): 62—65. Shen N P, Hu J J, Chen G, et al. The comprehensive plan on the construction of coastal shelterbelt of Yuyao (In Chinese). East China Forest Management, 2010, 24(1): 62—65
- [22] 中华人民共和国林业部科技司编. 林业标准汇编(三). 北京: 中国林业出版社, 1991. Department of Science and Technology, State Forestry Administration, P R China. Forestry criteria (No. 3) (In Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 1991
- [23] Li J L, Li W F, Yang X P, et al. The impact of land use change on quality evolution of soil genetic layers on the coastal plain of south Hangzhou Bay. J Geogr Sci, 2008, 18(4): 469—482
- [24] 单奇华, 俞元春, 张建锋, 等. 城市森林土壤肥力质量综合评价. 水土保持通报, 2009, 29(4): 186—190. Shan Q H, Yu Y C, Zhang J F, et al. Comprehensive estimation of urban forest soil fertility (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(4): 186—190
- [25] 孙向阳. 土壤学. 北京: 中国林业出版社, 2006: 131—134. Sun X Y. Soil science (In Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 2006: 131—134
- [26] 阚文杰, 吴启堂. 一个定量综合评价土壤肥力的方法初探. 土壤通报, 1994, 25(6): 245—247. Kan W J, Wu Q T. A quantitative method for assessing soil fertility quality (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1994, 25(6): 245—247
- [27] 邓南荣, 吴志峰, 刘平, 等. 城市园林绿化用地土壤肥力诊断与综合评价. 土壤与环境, 2000, 9(4): 287—289. Deng N R, Wu Z F, Liu P, et al. Diagnosis and integrated evaluation on soil fertility of urban garden land (In Chinese). Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(4): 287—289
- [28] 秦明周, 赵杰. 城乡结合部土壤质量变化特点与可持续性利用对策. 地理学报, 2000, 55(5): 545—553. Qin M Z, Zhao J. Strategies for sustainable use and characteristics of soil quality changes in urban-rural marginal area (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 545—553

CHARACTERIZATION OF EFFECTS OF MANAGEMENT MODES ON QUALITY OF COASTAL SALT-AFFECTED SOILS WITH QUALITY INDEX

Shan Qihua^{1,2} Zhang Jianfeng^{1†} Tang Huajun³ Ruan Weijian³ Shen Liming⁴ Chen Guangcai¹

(1 Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forest, Fuyang, Zhejiang 311400, China)

(2 Yixing Forestry Technology Extension Station, Yixing, Jiangsu 214206, China)

(3 Agriculture and Rural Office of Simen Town, Yuyao, Zhejiang 315470, China)

(4 Yuyao Forestry Technology Extension Station, Yuyao, Zhejiang 315400, China)

Abstract Natural evolution-based management mode, forestry-based management mode and agriculture-based management mode are three classical modes of management applied extensively to reclamation of coastal salt-affected land. To reveal effects of the three typical modes of management on soil quality, soil samples were taken from fields under the three

modes of management, separately for analysis of laws of the dynamic variation of soil quality of the lands, using the soil single quality index (SSQI) method and the soil comprehensive quality index (SCQI) method. Results show that based on SSQI, the soil in the study zone on the whole could be sorted into the categories of excellent and good in soil bulk density, total porosity, aeration porosity, and salt content, into the category of moderate in soil pH, total phosphorus, available phosphorus, and available potassium, and into the categories of moderate and poor in soil texture, organic matter, total nitrogen, and micro biomass, indicating that the agriculture- and forestry-based managements could effectively improve the soil indices, such as salt content, organic matter, TN, TP, available P and available K. But based on SCQI, the mean value was 1.2 ± 0.1 , implying that the soil was ordinary in quality and unfavorable for plant growth. The mean SCQI value of the agriculture-based management, forestry-based management and natural evolution-based management was 1.24 ± 0.11 , 1.2 ± 0.1 and 1.14 ± 0.09 , respectively, which indicates that differences exist between the three modes in soil quality. Though the differences were rather stable, they did not reach up to the significant level statistically. Artificial interferences, such as forestry- and agriculture-based managements, are the main factor inducing temporal and spatial variation of the soil quality within a short period of time, thus accelerating the evolution process of the coastal salt-affected land in soil quality.

Key words Salt-affected land; Quality index; Nemoro; Temporal and spatial variation; Yuyao