

浙南海涂围垦区土壤品质综合评价

杨升¹, 陈秋夏¹, 王金旺¹, 李效文¹, 夏海涛¹, 包考松², 郑托²

(1. 浙江省亚热带作物研究所, 浙江温州 325005; 2. 温州市瓯江口开发建设投资集团有限公司, 浙江温州 325026)

摘要: 系统掌握浙南海涂围垦区土壤品质现状和空间分布特征, 为绿地系统规划、土壤改良措施和绿化工程实施提供参考依据。通过取样调查, 获得土壤基本性状, 再采用模糊数学综合评价土壤品质与分级, 并运用全球定位系统(GPS), ARCGIS 分析软件和 Surfer 软件获得土壤品质等值线分布图。结果表明: ①研究区域土壤容重偏大, 为 $1.32 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 且含盐量高, 为 $7.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱性强, pH 8.25, 有机质质量分数偏少, 为 $17.94 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮和有效磷质量分数严重偏低, 分别为 $0.69 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4.82 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而速效钾质量分数丰富, 为 $0.62 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。②土壤含盐量是浙南滨海围垦区土壤品质的主要限制因子, 容重和 pH 值也是重要评价指标。③研究区域土壤品质总体较差, 并且表层土壤品质(综合评价值为 0.482)略好于下层土壤(综合评价值为 0.435)。土壤品质分级与等值线分布图可以更好地指导土壤改良和植被构建, 需要降低土壤含盐量、pH 值和容重, 选取优良耐盐碱植物进行绿化种植。图 1 表 5 参 33

关键词: 土壤学; 浙南; 围垦区; 综合评价; 土壤品质分级

中图分类号: S714.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2016)06-0961-08

Soil quality evaluation in a coastal reclamation region of southern Zhejiang Province

YANG Sheng¹, CHEN Qiuxia¹, WANG Jinwang¹, LI Xiaowen¹, XIA Haitao¹, BAO Kaosong², ZHENG Tuo²

(1. Zhejiang Institute of Subtropical Crops, Wenzhou 325005, Zhejiang, China; 2. Wenzhou Oujiangkou Development and Construction Investment Group Co., Ltd., Wenzhou 325026, Zhejiang, China)

Abstract: To systematically comprehend soil quality status and its spatial pattern in a coastal saline reclamation region of southern Zhejiang Province, to provide a reference for green space system planning, and for soil improvement and implementation of the green project, basic soil properties were obtained through survey sampling. A total of 61 soil samples which was composed of 8 to 12 profiles mixed in 0–20 cm and 40–60 cm were collected. A comprehensive soil quality evaluation and classification was conducted using fuzzy mathematics. Then, a soil quality contour map was obtained using GPS, ARCGIS analysis software, and Surfer software. Results showed that (1) soil bulk density ($1.32 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), salt content ($7.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), and pH (8.25) were all extremely high; soil organic matter ($17.94 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), total nitrogen ($0.69 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), and available phosphorus content ($4.82 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) were severely deficient; and available potassium ($0.62 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) was abundant. (2) Soil salinity was the main limiting soil quality factor with soil bulk density and pH being important evaluation indexes. (3) Soil quality status across the study region was generally low with soil quality for the topsoil (I_{F} : 0.482) better than the subsoil (I_{F} : 0.435). Therefore, soil quality classification and contour mapping could provide guidance for soil improvement and vegetation planning, but for landscaping, soils would require lower soil salt content,

收稿日期: 2015-11-05; 修回日期: 2016-04-13

基金项目: 浙江省农业科学院青年人才培养项目(2015R26R08E03); 温州市公益性农业科技项目(N20150022); 温州市森林生态科技创新团队项目(C20150002)

作者简介: 杨升, 助理研究员, 博士, 从事盐碱地生态治理研究。E-mail: yangsheng0072001@sina.com。通信作者: 陈秋夏, 研究员, 博士, 从事森林生态研究。E-mail: yzscqx@163.com

pH, and soil bulk density, along with a selection of highly salt-tolerant plants. [Ch, 1 fig. 5 tab. 33 ref.]

Key words: soil science; southern Zhejiang Province; reclamation region; comprehensive evaluation values; soil quality classification

海涂围垦是扩展港口、工业发展空间和城市建设用地的有效途径。近几年来,沿海地区向浅海和滩涂地带迅速扩张,围垦和填海造陆势不可挡。浙南椒江、瓯江、鳌江的海涂面积为 6.8 万 hm^2 , 已围垦利用面积 1.3 万 hm^2 。温州滩涂围垦总体规划显示:全市适宜造地的规划滩涂区面积约为 4.5 万 hm^2 , 至 2020 年滩涂围垦总建设规模 3.4 万 hm^2 。另外,围垦区城市绿化是改善城市环境和提高广大市民生活品质的公益事业,也是彰显建设环境友好型宜居城市的一个重要标志,而城市绿化离不开土壤,城市绿化土壤作为植物生长的物质基础,其品质直接影响着植物的健康生长以及生态效益、景观功能的发挥。因此,开展海涂围垦区土壤品质调查和评价对于合理开发利用围垦区土壤,并提高土壤生产力具有重要的战略意义。到目前为止,国内外学者在土壤品质评价方面开展了大量的研究,主要集中在耕地^[1-3]、农副产品用地^[4-6]和林业用地^[7-9],对于滨海盐碱地的研究也有少量报道^[10-12]。在评价过程中,使用的方法主要包括模糊综合评价法^[13-14]、最小数据集^[15-16]、主成分分析^[17]等,并且随着科学技术的发展,地理信息系统(GIS)技术^[18]、多变量最优化能量色散 X 射线荧光和散射光谱^[19]、X 射线断层成像^[20]等方法也逐渐应用于土壤品质评价和监测。一般情况下,滨海围垦区土壤主要分建设用地和城市绿化用地。由于浙南滨海围垦区土壤属于典型的泥质海岸盐碱土,土壤板结严重,极不利于植物生长,造成绿化建设困难,生态环境脆弱。本研究以浙南瓯江口围垦区为研究区域,通过取样调查该区域土壤基本理化性质,利用模糊数学中的隶属函数法结合相关分析法,对土壤品质进行综合评价,并运用全球定位系统(GPS)定位,ARCGIS 分析软件进行空间坐标转换和 Surfer 软件绘制等值线图,从而获得该区域土壤品质的空间分布情况,以期系统掌握该围垦区土壤品质现状和空间分布特性,为绿地系统的规划建设、土壤改良措施和植被构建提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区域为浙江省温州市瓯江口新区的起步区和浅滩一期区,总面积为 24 km^2 。根据瓯江口新区规划,该研究区域总绿地面积为 4.37 km^2 ,主要包括城市公园 9 个,广场 2 个,景观道路 19 条。该区域地处东海与瓯江的交汇处,属于中亚热带海洋性季风气候区,年均降水量为 1 674.3 mm,主要集中在 3-9 月。

1.2 样品采集与分析

于 1 月下旬,在研究区域范围内,根据植被情况和建设规划用途,在非绿化建设用地,0.5 km^2 设置 1 个取样点,每个取样点采用“蛇形法”,由 8~12 个点混合组成(有植被区域点少,无植被区域点多),而绿化用地,0.2 km^2 设置 1 个取样点,每个取样点采用“蛇形法”(公园和广场区域)或“棋盘法”(景观道路区域),由 8~12 个点混合组成,总共布设了 61 个取样点。每个样点均对表层土(0~20 cm)和下层土(40~60 cm)分别取样,为保证样品的代表性,每个样点均做复样采集,将其相同土层的土壤混合均匀成混合样,组成待测样品。同时,表层土壤进行土壤容重测量,环刀采样。鉴于最上层土壤易受到干扰,因此,以 5~15 cm 土壤容重作为本研究表层土容重。采样点的坐标采用 GPS 定位仪记录。采集样品时,距离最后一次降雨已有 12 d,部分区域地表出现干裂。

室内分析测试指标包括有机质、全氮、有效磷、速效钾、pH 值和含盐量。除 pH 值外,其他指标测量方法均参照《土壤农化分析》^[21]。土壤有机质质量分数采用重铬酸钾氧化-外加加热法;全氮质量分数采用半微量开氏法;有效磷测定采用碳酸氢钠-钼锑抗比色法;速效钾测定采用醋酸铵浸提-火焰光度法;土壤含盐量采用 $V(\text{水}):V(\text{土})=5:1$ 浸提-电导法。土壤 pH 值测定采用电位法^[22]。

2 结果与分析

2.1 评价指标描述性统计分析

土壤容重大小反映土壤结构、透气性、透水性能以及保水能力的高低。土壤容重越小说明土壤结构、透气透水性能越好。一般耕作层土壤容重约为 $1.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，本研究区域土壤容重均值为 $1.32 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，最大值达到 $1.61 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (表 1)，说明该区域土壤普遍表现为紧实趋势，这也是泥质海岸带土壤的特点之一。表层土壤含盐量和下层土壤含盐量平均值分别为 7.7 和 $6.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，中位值分别为 4.0 和 $4.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，均达到重度盐渍化土壤标准^[23-24]。有机质、全氮、有效磷和速效钾在表层中的平均质量分数分别为 $17.94 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， $0.69 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， $4.82 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.62 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，在下层中的质量分数分别为 $17.10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， $0.63 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， $4.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.69 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。根据土壤养分全国统一划分的 6 级制分级标准评判，该研究区域有机质质量分数偏少，能够满足一般花草种植所需，但不能满足行道树种植；总氮、有效磷质量分数偏低，而速效钾总体相对较为丰富。表层和下层的 pH 值均值分别为 pH 8.25 和 pH 8.48，都属于碱性土壤。另外，从变异系数来看，该区域土壤含盐量变异系数最大，分别为 103.90% 和 93.94%，容重和 pH 值变异系数较小，其余各指标变异系数为 20.80%~47.83%，呈中等变异强度。总体上，该研究区域土壤品质较差，主要是含盐量高，肥力偏低，并且盐分分布极不均匀。

由表 2 可知：容重与含盐量、pH 值、速效钾呈极显著相关，说明在泥质海岸围垦区容重是土壤品

表 1 表层和下层土壤品质评价指标统计特征值 ($n=61$)

Table 1 Statistical feature values of soil quality evaluation indices of topsoil and subsoil ($n=61$)

土层	项目	土壤容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含盐量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机质/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH 值	总氮/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
表层土	最小值	0.90	0.40	1.74	7.02	0.17	0.68	0.09
	最大值	1.61	32.60	31.53	9.33	2.38	17.40	1.15
	平均值	1.32	7.70	17.94	8.25	0.69	4.82	0.62
	中位值	1.36	4.00	18.38	8.20	0.67	4.60	0.61
	标准差	0.16	8.00	4.95	0.42	0.33	2.09	0.27
	变异系数/%	12.12	103.90	27.59	5.09	47.83	43.36	43.55
	偏度	-0.77	1.37	-0.47	-0.20	2.66	3.73	-0.01
	峰度	0.12	1.43	1.79	0.79	11.76	21.98	-1.00
下层土	最小值		0.30	4.20	7.40	0.20	1.43	0.14
	最大值		32.00	35.83	9.77	1.51	8.10	1.30
	平均值		6.60	17.10	8.48	0.63	4.52	0.69
	中位值		4.50	17.18	8.45	0.57	4.60	0.71
	标准差		6.20	5.54	0.44	0.24	0.94	0.28
	变异系数/%		93.94	32.40	5.19	38.10	20.80	40.58
	偏度		1.47	0.23	0.30	1.21	0.20	-0.15
	峰度		3.28	1.18	0.47	2.46	4.00	-0.97

表 2 表层和下层土壤各评价指标间 Pearson 相关系数矩阵 ($n=61$)

Table 2 Pearson correlation matrix of soil evaluation indices of topsoil and subsoil ($n=61$)

指标	含盐量	有机质	pH 值	全氮	有效磷	速效钾
土壤容重	-0.438**	-0.107	0.373**	-0.173	-0.038	-0.470**
含盐量		-0.164	0.378**	0.115	-0.169	0.753**
有机质	-0.312*		-0.275*	0.325*	0.501**	0.232
pH 值	0.464**	0.111		-0.342**	-0.073	-0.215
全氮	0.337**	0.266*	-0.015		0.219	0.140
有效磷	-0.135	0.182	0.388**	0.343**		-0.110
速效钾	0.675**	0.483**	-0.059	0.448**	0.069	

说明：表格上方数据为表层土，下方数据为下层土。

质评价的重要指标。在表层土壤中含盐量与容重、pH值呈极显著负相关，与速效钾质量分数呈极显著正相关，而在下层土壤中含盐量与pH值呈极显著负相关，与全氮、速效钾呈极显著正相关，与有机质呈显著性正相关，这说明盐分是土壤品质的主要限制因子，钾盐也是构成土壤盐分的重要成分，由于土壤结构紧实，透水透气性差，从而限制了土壤中盐分的运移。pH值在表层土壤中与容重、全氮、有效磷质量分数呈显著性正相关，与盐分、有机质呈显著负相关，而下层土壤中与盐分极显著负相关，与有效磷质量分数呈极显著正相关，这表明在pH值是土壤品质重要的评价因子。在表层土壤中，有机质质量分数与pH值、有效磷质量分数呈显著相关；在下层土壤中，与含盐量、全氮、速效钾显著性相关。这种差异很可能是由于该区域是泥质海岸带，土壤容重较大，上层土壤与下层土壤之间物质交流困难造成的。

2.2 土壤品质综合性评价

2.2.1 隶属函数的确定 由于影响土壤品质的因素很多，需要建立一个较为全面的综合评估方法进行准确判断。首先建立各评价指标的隶属函数进行归一化处理，计算其隶属度值 $f(x)$ ，用来表示各项土壤指标的状态。根据前人的研究基础，再结合该区域滨海围垦区的实际情况特征，本研究选用戒上型隶属函数和戒下型隶属函数2种方法来确定各指标的隶属函数值。其一，戒上型隶属函数，即在一定范围内，评价指标的增长对植物的生长有利好关系，低于此范围对植物生长不利，大于此范围对促进植物生长影响较小。属于此类型的参数包括总氮、有效磷、速效钾、有机质质量分数。其函数关系式为：

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & x \geq x_2 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1, & x_1 \leq x < x_2 \\ 0.1 & x < x_1 \end{cases}$$

其二，戒下型隶属函数，即在一定范围内，评价指标的增长对植物的生长不利，大于此范围对植物生长不利，低于此范围对促进植物生长影响较小。属于此类型的参数包括含盐量、土壤容重和pH值，实际上pH值属于抛物线型隶属函数，植物生长有最佳范围，超出最佳范围，偏离程度越大植物生长越差，甚至不能生长。然而，考虑到该研究区域土壤pH值最低为pH 7.02，属于最佳范围(pH 6.5~pH 7.5)，因而也采用戒下型隶属函数来分析。其函数关系式为：

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x \geq x_2 \\ 0.9(x_2-x)/(x_2-x_1)+0.1, & x_1 \leq x < x_2 \\ 1.0 & x < x_1 \end{cases}$$

根据上述隶属函数来确定隶属值，首先必须确定各个指标的转折点 x_1 和 x_2 。结合相关文献^[10]和滨海围垦区土壤绿化建设要求，分别确定了隶属函数中转折点的相应取值。结果见表3。

表3 隶属函数曲线中各评价指标转折点的取值

Table 3 Value of turning point of each evaluation index in membership functions

转折点	土壤容重/(g·cm ⁻³)	含盐量/(g·kg ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	pH值	总氮/(g·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(g·kg ⁻¹)
x_1	1.25	1.50	8.00	7.50	0.65	4.00	0.04
x_2	1.45	4.00	35.00	8.50	1.75	30.00	0.18

2.2.2 评价指标权重的确定 需要根据各个指标对土壤品质水平总体构成中实际贡献率的大小来确定权重，以保证评价的精度和评价结果的准确性。确定评价指标的权重最常用的方法包括相关分析法、层次分析法、主成分分析法和熵值法等。本研究采用相关分析法来确定权重值，即利用各指标间相关系数来

表4 各评价指标的权重

Table 4 Weighing of each evaluation index

土层	项目	土壤容重	含盐量	土壤有机质	pH值	总氮	有效磷	速效钾
表层土	相关系数均值	0.267	0.336	0.267	0.276	0.219	0.185	0.320
	权重	0.143	0.180	0.143	0.148	0.117	0.099	0.171
下层土	相关系数均值		0.385	0.271	0.207	0.282	0.223	0.347
	权重		0.224	0.158	0.121	0.164	0.130	0.202

确定权重。首先计算各个参数之间的相关系数，然后求各个参数之间相关系数的均值，以该均值占有所有参数相关系数均值总和的比值作为该单项参数的权重。其结果见表 4。

2.2.3 土壤品质综合评价值计算 土壤品质等级是根据各项指标综合评价价值来确定。综合评价价值(I_{H})是

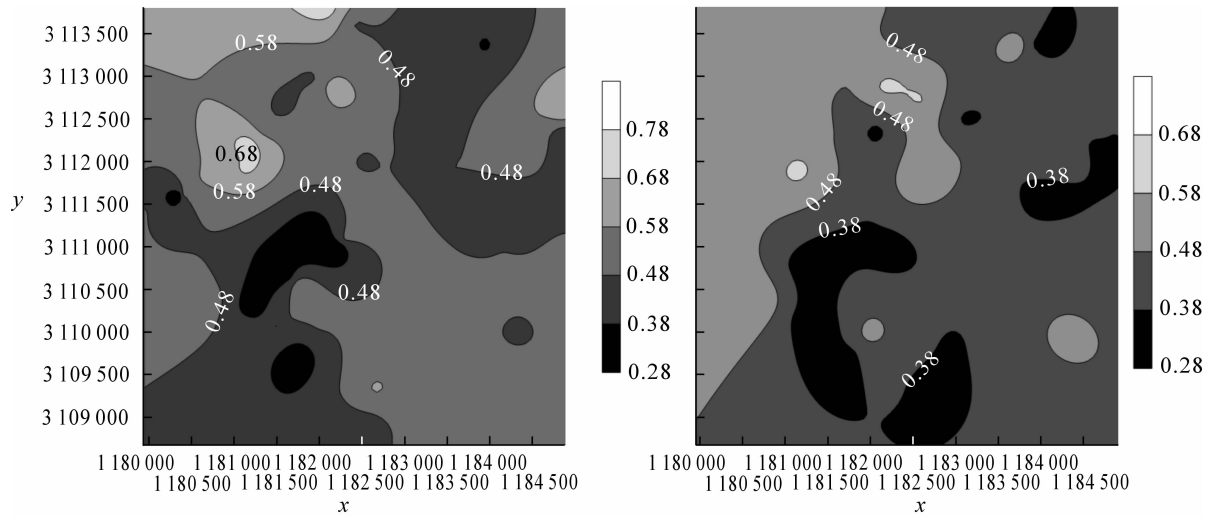
根据各项指标的隶属度值和权重值计算获得，计算公式为： $I_{\text{H}} = \sum_{i=1}^n f_i \times w_i$ 。其中： n 表示评价指标个数， f_i

和 w_i 分别表示第 i 种评价指标的隶属度值和权重值。综合评价价值反映了研究区域的土壤品质状况，是土壤品质等级划分的依据。结合浙南滨海滩涂的生态环境现状，参考国内相关研究结果^[10]，滨海围垦区土壤品质划分等级为： $I_{\text{H}} \geq 0.58$ ，土壤品质较好； $0.38 < I_{\text{H}} < 0.58$ ，土壤品质较差； $I_{\text{H}} \leq 0.38$ ，土壤品质极差。从表 5 可以发现：该研究区域表层和底层土壤总体较差，综合评价价值 I_{H} 低于 0.58 的样点个数分别占到总数的 86.89% 和 95.08%。表层土壤综合评价价值的最大值、平均值以及 $I_{\text{H}} > 0.38$ 的样点数都要高于下层土壤。土壤品质综合评价等值线图(图 1)显示，该研究区域西北方位(远海位)土壤品质较好，东南方位(近海位)品质较差，并且比较表层等值线图与下层等值线图可以发现，下层土壤区域分布更集中，更均匀，中间对角区域表层土壤品质要略好于下层土壤。

表 5 土壤品质分级统计表

Table 5 Statistics of soil quality classification

土层	综合评价价值 I_{H}			$I_{\text{H}} \geq 0.58$ /个	$0.38 < I_{\text{H}} < 0.58$ /个	$I_{\text{H}} \leq 0.38$ /个
	最小值	最大值	平均值			
表层土	0.291	0.764	0.482	8	43	10
下层土	0.297	0.635	0.435	3	36	22



x轴和y轴为平面位置坐标。

图 1 土壤品质综合评价等值线分布图(左图为表层土，右图为下层土)

Figure 1 Contour map of comprehensive evaluation value of soil quality (Left: topsoil; Right: subsoil)

3 结论与讨论

指标的选取是土壤品质评价的核心，直接关系到评价结果的客观性和准确性，指标过多不仅获取难度增大，而且实用性较差，不利于推广。土壤含盐量和 pH 值是盐碱地最基本的特征指标，也是开展土壤改良的基本依据，在大量盐碱地研究报道中，这 2 个因子常作为主要指标^[25-27]。也有研究表明，在一些土壤品质指标难以获得的情况下，可采用土壤有机质、速效养分和土壤盐分进行评价，甚至仅用土壤盐分和有机质也可以得到较好的评价结果^[12, 28-29]。土壤容重直接影响土壤中水、气运行，进而影响土壤中物质和能量的运移。容重越大，运移越困难。在调查土壤基本状况或监测改良效果时，容重常作为一个重要评价指标^[11, 30-31]。因此，本研究选取了土壤有机质、含盐量、pH 值、容重和养分指标来综合评价土壤品质。

姚荣江等^[10,29]研究显示:土壤容重仅与有机质含量显著性相关,并且权重系数最小,但本试验结果发现,容重与含盐量、pH值、速效钾呈极显著相关,并且权重与有机质、pH值的权重相同或接近(表4)。这表明在浙南海涂围垦区,容重是一个重要指标,调节土壤容重可以影响土壤中的含盐量、pH值和速效钾含量。同时,在大庆^[11]、苏北^[29]等盐碱地的研究认为,土壤含盐量、pH值变化,会影响土壤养分的供应。本研究中,表土层pH值与含盐量、有机质、全氮、有效磷呈极显著或显著性相关,而下层土含盐量与有机质、pH值、全氮、速效钾呈极显著或显著性相关,这说明土壤含盐量和pH值直接影响土壤养分。

本研究利用模糊数学方法对浙南海涂围垦区土壤进行综合评价,不仅将表层土壤和下层土壤分别进行评价,而且分析了2层土壤的空间分布特征。总体上,围垦较早区域土壤品质较好,表层土壤品质要略好于下层土壤。这可能有以下几个方面的原因:首先,浙南地区属于雨水较多区域,土壤中的盐分随雨水淋溶而减少,但由于土壤容重较大,透水透气性较差,造成雨水较难渗透到下层土壤,相应表层土壤返盐效果也较弱;其次,较早围垦区域已有植被覆盖,以草本植物为主,既可以改善表层土壤的水盐运动,又可以提高表层土壤有机质含量;第三,较早围垦区域和表土层容易受到人为活动的影响,如开荒种植。因此,获取的土壤品质等级和等值线分布图有利于对该区域更加清晰和直观的认识,从而更好地指导围垦区土壤改良和植被构建。对于品质等级较好和较差的区域,可以通过施加强酸性有机肥^[31-32]、种植耐盐植物^[30,32]逐步改善土壤结构条件,对于品质等级极差的区域,应先经过一定的工程措施,改善土壤结构,提高土壤透水透气性^[31-33],再施加强酸性有机肥、栽植耐盐植物,具体改良措施和植被构建还有待进一步研究探讨。

浙南海涂围垦区土壤体积质量大且盐度高,碱性强;土壤有机质质量分数总体偏少,全氮和有效磷质量分数偏低,速效钾相对丰富;土壤含盐量变异系数大,容重和pH值变异系数较小。相关性分析和权重指数都表明含盐量是滨海围垦区土壤品质的主要限制因子,而容重和pH值与含盐量均存在极显著负相关性,说明在浙南泥质海岸带围垦区土壤品质评价中,容重和pH值也是重要指标。研究区域土壤品质总体较差,并且分布不均,不宜直接进行绿化种植,需要改善土壤结构,提高土壤透水透气性,增加有机质含量,降低土壤盐度和pH值,要注重对下层土壤条件的改良,改善上、下层土壤间的水盐运移环境。

4 参考文献

- [1] PANDEY D, AGRAWAL M, BOHRA J S. Assessment of soil quality under different tillage practices during wheat cultivation: soil enzymes and microbial biomass [J]. *Chem Ecol*, 2015, **31**(6): 510 – 523.
- [2] 倪中应. 桐庐县耕地质量评价及其障碍因素分析[J]. 中国农学通报, 2015, **31**(4): 188 – 192.
NI Zhongying. Evaluation of quality and analysis of obstacle factors of cultivated land in Tonglu County [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2015, **31**(4): 188 – 192.
- [3] LIU Zhangjun, ZHOU Wei, LI Shutian, et al. Assessing soil quality of gleyed paddy soils with different productivities in subtropical China [J]. *Catena*, 2015, **133**: 293 – 302.
- [4] SUPRIYADI S, SUDARYANTO R, WINARNO J, et al. The quantitative soil quality assessment tobacco plant in Sindoro mountainous zone [J]. *J Degr Min Lands Manage*, 2014, **1**(17): 105 – 110.
- [5] SALOME C, COLL P, LARDO E, et al. Relevance of use-invariant soil properties to assess soil quality of vulnerable ecosystems: The case of Mediterranean vineyards [J]. *Ecol Indic*, 2014, **43**(8): 83 – 93.
- [6] CHENG Jinjin, DING Changfeng, LI Xiaogang, et al. Soil quality evaluation for navel orange production systems in central subtropical China [J]. *Soil Tillage Res*, 2016, **155**: 225 – 232.
- [7] 赵旭炜, 贾树海, 李明, 等. 对砭石山不同植被恢复模式的土壤质量评价[J]. 东北林业大学学报, 2014, **42**(11): 98 – 102.
ZHAO Xuwei, JIA Shuhai, LI Ming, et al. Soil quality assessment by TOPSIS method based on PCA in the afforested coal gangue area [J]. *J Northeast For Univ*, 2014, **42**(11): 98 – 102.
- [8] 赵娜, 孟平, 张劲松, 等. 华北低丘山地不同退耕年限刺槐人工林土壤质量评价[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(2): 351 – 358.

- ZHAO Na, MENG Ping, ZHANG Jinsong, *et al.* Soil quality assessment of *Robinia pseudoacacia* plantations with various ages in the grain-for-green program in hilly area of North China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25**(2): 351 – 358.
- [9] 李静鹏, 徐明峰, 苏志尧, 等. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价[J]. *生态学报*, 2014, **34**(9): 2297 – 2307.
- LI Jingpeng, XU Mingfeng, SU Zhiyao, *et al.* Soil fertility quality assessment under different vegetation restoration patterns [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(9): 2297 – 2307.
- [10] 姚荣江, 杨劲松, 陈小兵, 等. 苏北海涂围垦区土壤质量模糊综合评价[J]. *中国农业科学*, 2009, **42**(6): 2019 – 2027.
- YAO Rongjiang, YANG Jinsong, CHEN Xiaobing, *et al.* Fuzzy synthetic evaluation of soil quality in coastal reclamation region of north Jiangsu Province [J]. *Sci Agric Sin*, 2009, **42**(6): 2019 – 2027.
- [11] 刘东兴, 宫伟光. 大庆盐碱地立地质量评价[J]. *中国水土保持科学*, 2009, **7**(3): 98 – 103.
- LIU Dongxing, GONG Weiguang. Evaluation of site quality for saline-alkali soil in Daqing [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2009, **7**(3): 98 – 103.
- [12] 王建庆, 冯秀丽, 项璐. 基于模糊数学法的滩涂围垦区土壤肥力特征评价[J]. *宁波大学学报: 理工版*, 2013, **26**(4): 101 – 106.
- WANG Jianqing, FENG Xiuli, XIANG Lu. Application: fuzzy mathematics in integrated evaluation for soil fertility of coastal reclamation district [J]. *J. Ningbo Univ Nat Sci Eng Ed*, 2013, **26**(4): 101 – 106.
- [13] 陈晓杰, 何政伟, 薛东剑. 基于模糊综合评价的土壤环境质量研究: 以九龙县里伍铜矿区为例[J]. *水土保持研究*, 2012, **19**(1): 130 – 133.
- CHEN Xiaojie, HE Zhengwei, XUE Dongjian. Study on soil environmental quality based on fuzzy comprehensive evaluation: a case study of Liwu copper area in Jiulong County [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2012, **19**(1): 130 – 133.
- [14] 赵振亚, 姬宝霖, 宋小园, 等. 基于层次分析和模糊数学法的公乌素土壤质量评价[J]. *干旱区研究*, 2014, **31**(6): 1010 – 1016.
- ZHAO Zhenya, JI Baolin, SONG Xiaoyuan, *et al.* AHP and fuzzy mathematics based soil quality evaluation in Gongwusu [J]. *Arid Zone Res*, 2014, **31**(6): 1010 – 1016.
- [15] CHEN Yudong, WANG Huoyan, ZHOU Jianmin, *et al.* Minimum data set for assessing soil quality in farmland of Northeast China [J]. *Pedosphere*, 2013, **23**(5): 564 – 576.
- [16] 贡璐, 张雪妮, 冉启洋. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价[J]. *土壤学报*, 2015, **52**(3): 682 – 689.
- GONG Lu, ZHANG Xueni, RAN Qiyang. Quality assessment of oasis soil in the upper reaches of Tarim River based on minimum data set [J]. *Acta Pedol Sin*, 2015, **52**(3): 682 – 689.
- [17] 张子龙, 王文全, 缪作清, 等. 主成分分析在三七连作土壤质量综合评价中的应用[J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(6): 1636 – 1644.
- ZHANG Zilong, WANG Wenquan, MIAO Zuoqing, *et al.* Application of principal component analysis in comprehensive assessment of soil quality under *Panax notoginseng* continuous planting [J]. *Chin J Ecol*, 2013, **32**(6): 1636 – 1644.
- [18] BALAMURUGAN P, BALAKUMARAN S. Soil quality assessment around magnesite mines and salem township using GIS techniques [J]. *Int J Adv Eng Technol*, 2015, **8**(1): 1997 – 2003.
- [19] KANIU M I, ANGEYO K H. Challenges in rapid soil quality assessment and opportunities presented by multivariate chemometric energy dispersive X-ray fluorescence and scattering spectroscopy [J]. *Geoderma*, 2015, **241/242**: 32 – 40.
- [20] GARBOUT A, MUNKHOLM L J, HANSEN S B. Tillage effects on topsoil structural quality assessed using X-ray CT, soil cores and visual soil evaluation [J]. *Soil Tillage Res*, 2013, **128**: 104 – 409.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2013: 30 – 186.
- [22] 张万儒, 杨光滢, 屠星南, 等. LY/T 1239–1999 森林土壤 pH 值的测定[S]. 北京: 国家林业局, 2000.
- [23] 翁跃进. 作物耐盐品种及其栽培技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 7 – 19.
- [24] 董合忠, 辛承松, 李维江. 滨海盐碱地棉田盐度等级划分[J]. *山东农业科学*, 2012, **44**(3): 36 – 39.
- DONG Hezhong, XIN Chengsong, LI Weijiang. Soil salinity grading of cotton field in coastal saline area [J]. *Shandong Agric Sci*, 2012, **44**(3): 36 – 39.

- [25] 杨思存, 逢焕成, 王成宝, 等. 基于典范对应分析的甘肃引黄灌区土壤盐渍化特征研究[J]. 中国农业科学, 2014, **47**(1): 100 – 110.
YANG Sicun, PANG Huancheng, WANG Chengbao, *et al.* Characterization of soil salinization based on canonical correspondence analysis method in Gansu Yellow River Irrigation District of Northwest China [J]. *Sci Agric Sin*, 2014, **47**(1): 100 – 110.
- [26] 魏青军, 李白业, 李雪妮. 吐鲁番盆地平原区盐渍化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, **28**(4): 164 – 167.
WEI Qingjun, LI Baiye, LI Xueni. Analysis on the characters of soil salinization in the Turpan Basin [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2014, **28**(4): 164 – 167.
- [27] 张鹏锐, 李旭霖, 崔德杰, 等. 滨海重盐碱地不同土地利用方式的水盐特征[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(2): 117 – 121.
ZHANG Pengrui, LI Xulin, CUI Dejie, *et al.* Characteristics of water and salt under different land use in heavy coastal saline-alkaline land [J]. *J Soil Water Conserv*, 2015, **29**(2): 117 – 121.
- [28] 李新举, 刘宁, 张雯雯, 等. 黄河三角洲土壤质量自动化评价及指标体系研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, **15**(1): 145 – 148.
LI Xinju, LIU Ning, ZHANG Wenwen, *et al.* Evaluation index systems of soil quality in the Yellow River Delta [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2007, **15**(1): 145 – 148.
- [29] 姚荣江, 杨劲松, 曲长凤, 等. 海涂围垦区土壤质量综合评价的指标体系研究[J]. 土壤, 2013, **45**(1): 159 – 165.
YAO Rongjiang, YANG Jinsong, QU Changfeng, *et al.* Study on synthetic evaluation index systems of soil quality in coastal reclamation region [J]. *Soil*, 2013, **45**(1): 159 – 165.
- [30] 王璐, 仲启铨, 陆颖, 等. 群落配置对滨海围垦区土壤理化性质的影响[J]. 土壤学报, 2014, **51**(3): 638 – 647.
WANG Lu, ZHONG Qicheng, LU Ying, *et al.* Effects of configuration of plant community configuration on physical and chemical properties of coastal polder soil [J]. *Acta Pedol Sin*, 2014, **51**(3): 638 – 647.
- [31] 李旭霖, 刘庆花, 柳新伟, 等. 不同改良剂对滨海盐碱地的改良效果[J]. 水土保持通报, 2015, **35**(2): 219 – 224.
LI Xulin, LIU Qinghua, LIU Xinwei, *et al.* Improving effect of different amendment treatments in coastal saline-alkali soil [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2015, **35**(2): 219 – 224.
- [32] 王利民, 陈金林, 梁珍海, 等. 盐碱土改良利用技术研究进展[J]. 浙江林学院学报, 2010, **27**(1): 143 – 148.
WANG Limin, CHEN Jinlin, LIANG Zhenhai, *et al.* Research progress of improvement and utilization of saline and alkali soil [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2010, **27**(1): 143 – 148.
- [33] 殷小琳. 滨海盐碱地改良及造林技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
YIN Xiaolin. *Study on the Improvement of Coastal Saline-alkaline Land and Forestation Technology* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.