

DOI: 10.11766/trxb201905050105

胡琴, 陈为峰, 宋希亮, 董元杰, 刘志全, 王晓芳. 开垦年限对黄河三角洲盐碱地土壤质量的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 824-833.
HU Qin, CHEN Weifeng, SONG Xiliang, DONG Yuanjie, LIU Zhiquan, WANG Xiaofang. Effects of Reclamation/Cultivation on Soil Quality of Saline-alkali Soils in the Yellow River Delta[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(4): 824-833.

开垦年限对黄河三角洲盐碱地土壤质量的影响

胡琴¹, 陈为峰^{1, 2†}, 宋希亮^{1, 2}, 董元杰¹, 刘志全³, 王晓芳³

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018; 2. 山东省盐碱地植物—微生物联合修复工程技术研究中心, 山东泰安 271018; 3. 山东省土地综合整治服务中心, 济南 250014)

摘要: 以黄河三角洲开垦年限<5 a、10~15 a、20~25 a、30~35 a、50~60 a 的小麦/玉米连作土地利用类型为研究对象, 从土壤物理、化学、生物学指标出发, 选取容重、有机质、全氮、有效磷、速效钾、全盐、pH、蔗糖酶、碱性磷酸酶等 9 个土壤质量指标, 通过主成分分析, 计算土壤质量综合指数 (Soil Quality Index, SQI), 定量评价不同开垦年限土壤质量变化过程。结果表明: 土壤质量随开垦年限的增加呈增加的趋势, 与未开垦荒地相比, 开垦<5 a、10~15 a、20~25 a、30~35 a、50~60 a 的 SQI 在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层分别提高了 36.70%~161.49%和 164.44%~444.40%。SQI 在不同开垦年限期间表现出不同的上升程度, 与未开垦荒地相比, 开垦初期 (<5 a) 0~20 cm 和 20~40 cm 土层 SQI 分别提高了 36.70%和 164.44%, 开垦 10~15 a 后, SQI 较开垦初期 (<5a) 分别提高了 38.27%和 18.18%, 开垦 20~25 a 后较 10~15 a 分别提高了 10.37%和 39.35%, 30~35 a 较 20~25 a 分别提高了 24.42%和 24.79%, 50~60 a 较 30~35 a 分别提高了 0.74%和 0.17%。开垦<5 a、10~15 a、20~25 a、30~35 a、50~60 a 的 0~20 cm 土层分别较 20~40 cm 土层 SQI 提高了 65.69%、93.85%、53.53%、53.08%、86.95%。表明开垦种植作物会提高黄河三角洲盐碱地土壤质量。

关键词: 黄河三角洲; 主成分分析; 土壤质量; 开垦年限

中图分类号: F301.21 文献标志码: A

Effects of Reclamation/Cultivation on Soil Quality of Saline-alkali Soils in the Yellow River Delta

HU Qin¹, CHEN Weifeng^{1, 2†}, SONG Xiliang^{1, 2}, DONG Yuanjie¹, LIU Zhiquan³, WANG Xiaofang³

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. Shandong Engineering & Technology Research center for saline-alkali Land phyto-micro Remediation, Tai'an, Shandong 271018, China; 3. Shandong Province Center for Land Comprehensive Improvement and Service, Jinan 250014, China)

Abstract: [Objective] Soil reclamation/cultivation will sure affect soil environment of the saline-alkali soils involved and cause changes in soil quality. Therefore, it is necessary to explore or characterize changes in soil quality of the saline-alkali soils different in year of cultivation for reasonable utilization of saline-alkali soil resources. [Method] In this study, soil samples were

* 国家自然科学基金项目 (31570522)、山东省重大科技创新工程项目 (2018CXGC0307)、山东省林业科技创新项目 (LYCX03-2018-13) 资助
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31570522), Shandong Provincial Science and Technology Innovation Project (No. 2018CXGC0307) and Shandong Forestry Science and Technology Innovation Project (No. LYCX03-2018-13)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: chwif@sdau.edu.cn

作者简介: 胡琴 (1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事土地生态与退化治理研究。E-mail: huwu811@163.com

收稿日期: 2019-05-05; 收到修改稿日期: 2019-09-21; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-11-11

collected, separately, from the topsoil (0–20 cm) and subsoil (20–40 cm) layers of farmlands, under the same wheat/maize crop rotation system, but different in year of cultivation (< 5 a, 10–15 a, 20–25 a, 30–35 a and 50–60 a), in the saline-alkali soil region of the Yellow River Delta. The samples were analyzed from the aspects of soil physics, chemistry and biology, for bulk density, organic matter, total nitrogen, available phosphorus, readily available potassium, total salt, pH, sucrase and alkaline phosphatase, a total of nine soil quality indicators. On such a basis, principal component analysis was performed, SQI (Soil quality index) calculated and variation of soil quality in the farmland with years of cultivation evaluated quantitatively. 【Result】 Results show that soil quality improved with cultivation going on. Compared with virgin wasteland, the farmlands cultivated for < 5 a, 10–15 a, 20–25 a, 30–35 a, and 50–60 a were 36.97%–161.49% and 164.44%–444.40% higher in SQI of the 0–20 cm and 20–40 cm soil layers, respectively. SQI varied in increasing rate from period to period. Compared with the virgin wasteland, the farmland increased by 36.70% and 164.44% in SQI, respectively, in the 0–20 cm and 20–40 cm soil layers during the initial period of the cultivation (<5 a) and by 38.27% and 18.18% during the period of 10–15 a of cultivation; by 10.37% and 39.35% during the period of 20–25 a of cultivation as compared with that during the period of 10–15 a; by 24.42% and 24.79% during the period of 30–35 a of cultivation as compared with that during the period of 20–25 a of cultivation; and by 0.74% and 0.17% during the period of 50–60 a of cultivation as compared with that during the period of 30–35 a of cultivation. And SQI began leveling off after 30–35 a of cultivation. The 0–20 cm soil layer was 65.69%, 93.85%, 53.53%, 53.08% and 86.95% in SQI than the 20–40 cm soil layer, respectively, in the farmland cultivated for <5 a, 10–15 a, 20–25 a, 30–35 a and 50–60 a. 【Conclusion】 All the findings in this study demonstrate that crop cultivation improves soil quality, and the effect varies with the cultivation going on. It is, therefore, advisable to conduct comprehensive scoring based on principle component analysis so as to objectively and efficiently evaluate soil quality of farmlands different in year of cultivation.

Key words: Yellow River Delta; Principal component analysis; Soil quality; Years of cultivation

黄河三角洲拥有我国东部丰富的土地资源, 该地区土壤形成于退海之后, 受季风气候、海水侵蚀、成土原因等影响, 该地区土壤蒸发作用强且地下水位高, 土壤盐渍化严重^[1]。随着黄河三角洲高效经济发展以及“渤海粮仓”建设, 研究盐渍土土壤质量变化特征, 对后续土地利用具有重要的现实指导意义。区域土壤发展的历史, 实际就是土地不断被开垦利用的历史。土壤在开垦过程中会影响土壤环境, 引起土壤质量的改变。目前黄河三角洲土壤质量的研究侧重运用遥感和 GIS 对区域进行整体评价^[2], 而开垦对土壤质量的影响欠缺关注。已有研究表明, 东北黑土在开垦种稻第 85 年时, 0~20 cm 和 20~40 cm 土层有机碳含量显著低于荒地, 下降幅度分别为 19.93% 和 25.51%^[3]; 干旱区盐渍化荒地开垦后土壤有机碳和全氮随开垦年限呈逐渐增加的趋势^[4]; 随着开垦年限的增加, 有机碳和全磷在碳酸盐岩地区随开垦年限的增加呈先降低后升高的趋势^[5]。然而, 土壤质量并不是一个单一的概念, 包含了多方面的内容, 包括土壤的生产力、土壤环境、土壤动植物健康等, 包括了土壤物理、化学、生物的特性, 的能力因此决定了衡量土壤质量的变化不

能仅用某个单一的指标^[6]; 选择适当的评价方法, 对于准确评价土壤肥力水平具有重要意义, 目前, 土壤质量评价方法尚未有统一的标准^[7], 已有国内外学者采用主成分分析法^[8]、聚类分析法^[9]、灰色关联分析法^[10]、综合指数法^[11] 等对土壤质量进行了大量的研究。

本文选取黄河三角洲不同开垦年限的典型土壤为研究对象, 以样地空间变化代替时间序列, 选取 9 个反映土壤质量评价指标, 建立不同开垦年限土壤质量评价指标体系, 运用主成分分析计算出多个土壤质量评价指标下的土壤质量综合指数 (Soil Quality Index, SQI), 定量评价土壤质量的影响, 以为黄河三角洲土壤科学开垦及土壤质量管理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于黄河三角洲东营市河口区仙河镇, 坐标为 118°35'57" ~ 118°55'49"E, 37°53'20" ~ 37°56'22"N。该区属于北温带大陆性季风气候, 夏季年均降水量最高, 约 530~630 mm, 夏季年均蒸

发量为 1 885 mm, 年平均气温为 13.3℃, 平均无霜期为 206 d^[12]。区域土壤类型主要为盐化潮土, 土壤质地类型以粉砂壤土为主, 含有砂质壤土、黏壤土。研究区内农作物以棉花、玉米、小麦为主, 自然植被以芦苇、碱蓬、蒿类为主^[13]。地下水矿化度在空间分布上的总体规律表现为由内地向沿海方向地下水矿化度逐渐增加, 近内陆部分矿化度较低, 一般为 2 g·L⁻¹左右; 沿海地带地下水矿化度较高, 局部地区甚至大于 50 g·L⁻¹, 其他大部分地区地下水矿化度大于 10 g·L⁻¹。研究区灌溉水源来自黄河, 灌水方式为大水漫灌, 年均灌水量约为 2 250 m³·hm⁻²。依据不同形成时期, 陈建等^[14]将 1855 年黄河分流以来的黄河三角洲分为 8 个叶瓣, 研究区位于第 6 个叶瓣上, 陆地表土形成时间约为 1934—1938, 1963 年成立军马场开始开发, 至今盐碱地开垦历史已超过 50 a, 可视为整个黄河三角洲盐碱地开发进程的一个典型阶段, 是开展黄河口地区土地利用变化及生态效应研究的最佳天然实验室^[15]。

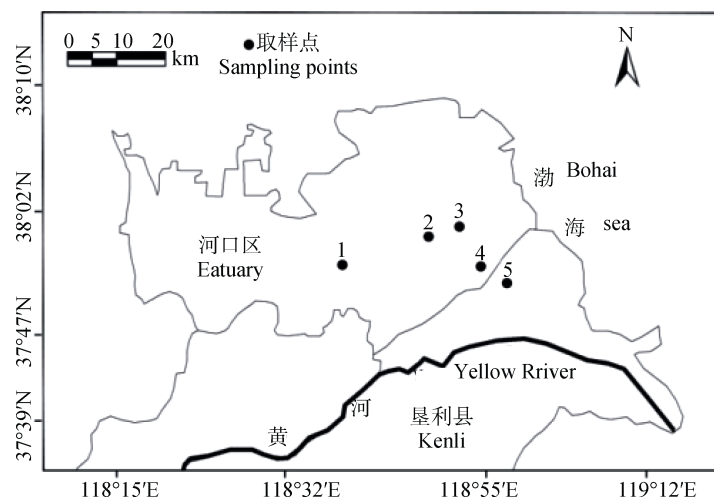
1.2 样点选取与样品采集

采样区根据土地利用变化研究有关文献^[16-17]、土地利用现状图并结合实地走访调查, 于 2016 年 8 月分别选取开垦 <5 a、开垦约 10~15 a (2005 年开发)、开垦约 20~25 a (1995 年开发)、开垦约 30~35 a (1985 年开发) 和开垦约 50~60 a (1956 年开发) 的耕地, 对照为未开垦盐碱荒地 (图 1)。由于

耕地土壤受环境因子影响较大, 本实验选取土壤类型相同、土地利用类型相同的样地进行研究。于 2016 年 8 月, 选择未开垦盐碱荒地裸地及上述不同年限 (<5 a、10~15 a、20~25 a、30~35 a、50~60 a) 的 6 个典型地块样地, 土地利用方式均为小麦/玉米连作, 土壤样品的取样深度为 40 cm, 利用直径 3 cm 土钻按照 20 cm 分层进行采样 (见表 1)。每个开垦年限选择三个相距不小于 1 000 m 的地块, 每个地块采用五点取样法, 每个样点为相距不小于 5 m 的三钻混合, 同时每块样点选取三个典型剖面, 分层采取 0~20 cm 和 20~40 cm 的原装土测定土壤容重。将采集好的土壤样品带回实验室, 放置阴凉通风处自然风干, 充分研磨, 以供土壤理化性状和土壤酶的测定。

1.3 评价指标的选取

由于土壤质量指标存在多样性, 而且在不同的土壤系统中差异较大, 在选取指标的过程中, 需要明确土壤质量评价目标^[18], 因此为了能够全面反映不同开垦年限下土壤质量的情况, 本研究从物理、化学、生物学性质出发, 依据土壤质量指标选取的针对性、区域性、敏感性和稳定性原则^[19], 评价样区土壤质量水平。参照前人研究成果, 选取了反映土壤物理性状的容重指标; 反映土壤养分指标有机质、全氮、有效磷、速效钾、全盐、pH; 反映土壤酶活性的生物学指标有蔗糖酶、碱性磷酸酶。



注: 图中编号 1 代表开垦 <5 a 取样地, 编号 2 代表开垦 10~15 a 取样地, 编号 3 代表开垦 20~25 a 取样地, 编号 4 代表开垦 30~35 a 取样地, 编号 5 代表开垦 50~60 a 取样地, 对照为未开垦荒地。Note: No. 1~5 stands for farmland cultivated for < 5 a, 10~15 a, 20~25 a, 30~35 a, and 50~60 a, respectively, and CK for virgin land.

图 1 取样点分布图

Fig. 1 Sampling point distribution map

表 1 不同垦殖年限区域基本概况

Table 1 General information of the farmland relative to years of cultivation

开垦年限 Year of cultivation year /a	种植方式 Cultivation mode	平均地下水埋深 Mean groundwater table /m	平均地下水矿化度 Average salinity of groundwater /(g·L ⁻¹)
<5	小麦玉米连作	0.96	9.40
10~15	小麦玉米连作	1.36	7.94
20~25	小麦玉米连作(近两年玉米单作)	0.85	10.21
30~35	小麦玉米连作	1.30	6.51
50~60	小麦玉米连作	1.14	8.42

1.4 土壤样品测定方法

土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定,全氮采用凯氏蒸馏法测定,速效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 比色法测定,速效钾采用火焰光度计法测定,土壤容重采用环刀法测定,pH 采用 pH 酸度计电位法(水:土为 5:1)测定;全盐采用烘干法测定,蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,碱性磷酸酶活性采用苯磷酸二钠比色法测定^[20-21]。

1.5 土壤质量分析方法

土壤质量指标隶属度采用降型或升型隶属度函数确定:

$$\text{升型: } f(x_i) = (x_{ij} - x_{i\max}) / (x_{i\max} - x_{i\min})$$

$$\text{降型: } f(x_i) = (x_{i\max} - x_{ij}) / (x_{i\max} - x_{i\min})$$

式中, $f(x_i)$ 表示第 i 项不同开垦年限下土壤质量的隶属度值(0~1), x_{ij} 表示不同开垦年限下土壤质量的指标的实际测定值, $x_{i\max}$ 和 $x_{i\min}$ 分别表示第 i 项评价土壤质量的指标在不同年限下的最大值和最小值。

不同开垦年限下土壤质量指标权重通过主成分分析计算:

$$W_i = \text{Cap}_i / \sum_{i=1}^n \text{Cap}_i$$

式中, W_i 表示在某一主成分中第 i 个土壤质量评价指标的权重; Cap_i 表示在某一主成分中第 i 个土壤质量评价指标因子载荷量的绝对值, n 表示评价不同开垦年限下土壤质量指标的数目。

不同开垦年限下土壤质量通过各评价指标结果进行综合定量确定,其计算公式:

$$\text{SQI} = \sum_{j=1}^n K_j \left(\sum_{i=1}^n W_i \times f(x_i) \right)$$

式中, n 为不同开垦年限下土壤质量评价指标的数目, m 为主成分的数目, K_j 为第 j 个主成分的方差贡献率, $f(x_i)$ 表示第 i 项土壤质量退化评价指标的隶属度值, W_i 表示在某一主成分中第 i 项土壤质量评价指标的权重。

2 结 果

2.1 土壤理化性状描述性统计特征

土壤开垦后,土壤属性发生了相应的变化,随着不同开垦年限的变化,土壤属性也呈现出不同的变化速率。根据表 2 可知,不同开垦年限的质量评价因子的变异系数均在 0~100% 范围内,属中等变异,变异最大的为 20~40 cm 土层的蔗糖酶,达到 60.24%,其次为 20~40 cm 土层全盐,根据滨海盐渍土划分等级,土壤全盐最大值超过 0.5%,属于重度盐渍土,0~20 cm 和 20~40 cm 土层的全盐均值分别属于轻度和中度盐渍;土壤 pH 范围为 7.93~8.56,呈碱性特征;按照全国第二次普查执行的土壤养分分级标准,0~20 cm 和 20~40 cm 土层的全氮和有机质分别属于中等和缺乏水平;有效磷在两个土层中均属于中等水平;0~20 cm 土层速效钾含量最高,20~40 cm 土层属于中等水平。

表 2 土壤质量评级指标描述性特征

Table 2 Descriptive indices for grading of soil quality

土壤属性 Soil properties	土层 Layers /cm	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Standard	变异系数 Coefficient of variation /%
有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	0~20	6.10	16.48	11.98	3.51	29.28
	20~40	5.08	11.86	9.16	2.36	25.75
全氮 Total N / (g·kg ⁻¹)	0~20	0.47	1.45	0.79	0.31	39.19
	20~40	0.27	1.16	0.57	0.28	49.16
速效钾 Avail K / (mg·kg ⁻¹)	0~20	85.16	190.85	136.82	35.93	26.26
	20~40	64.85	130.01	100.02	20.16	20.16
全盐 Total salt / (g·kg ⁻¹)	0~20	0.89	3.16	1.76	0.64	36.37
	20~40	1.19	5.62	2.90	1.44	49.79
速效磷 Avail P / (g·kg ⁻¹)	0~20	13.54	23.50	17.28	3.09	17.91
	20~40	12.53	17.71	14.60	1.55	10.61
pH	0~20	8.15	8.54	8.29	0.10	1.21
	20~40	7.93	8.56	8.26	0.18	2.24
蔗糖酶 Invertase / (mg·g ⁻¹)	0~20	9.00	29.47	17.23	7.29	42.34
	20~40	5.92	25.17	11.72	7.06	60.24
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase/ (mg·g ⁻¹)	0~20	6.86	15.39	11.40	3.10	27.18
	20~40	2.18	8.11	6.08	2.49	41.02
容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	0~20	1.22	1.48	1.36	0.09	6.30
	20~40	1.21	1.45	1.34	0.08	6.05

2.2 土壤质量指标的隶属度

土壤属性具有空间变异性,对土壤质量也存在动态影响,因此在进行土壤质量综合指数(SQI)计算之前必须对原始数据进行标准化处理,将各指标处理为0~1之间的标准隶属度值(表3),通过隶属度值的大小表明各项评价指标在土壤中的状态及对土壤质量的影响,隶属度值越大,表明在该指标下土壤质量越好,反之则表明该指标下土壤质量较差。根据土壤指标的敏感度,将指标分为三种函数:(1)一种越大越好的函数,如有机质、全氮等对土壤质量呈正相关的指标;(2)一种越小越好的函数,如全盐、容重等对土壤质量呈负相关的指标;(3)一种最优范围的函数,如pH,这些指标既可以使用越大越好的函数,也可以使用越小越好的函数,具体函数取决于指标的值是否低于或高于阈值^[22-23]。由于土壤质量评价指标具有变化连续性的特点,因此选择的隶属度函数则是可以表现各评价指标因子的连续性特点。在本研究中,有机质、全氮、速效钾、

有效磷、蔗糖酶和碱性磷酸酶采用升型分布函数,全盐、容重采用降型分布函数,样地pH均大于7,故也采用降型分布函数进行计算(表3)。

2.3 土壤质量评价指标体系权重

根据SPSS因子分析对选择的土壤质量指标进行主成分分析,从中提取各主成分及其方差贡献率、累计方差贡献率以及不同开垦年限下土壤质量评价指标在各主成分中的载荷值。三个主成分的累计方差贡献率达到87.593%,说明三个主成分基本涵盖了9个指标反映的主要内容,可以用来表现土壤属性的变异性,从各主成分的载荷可以看出,三个主成分可以解释>90%的指标为有机质、碱性磷酸酶;>80%的指标为速效钾、全盐、容重、pH;>70%的指标为全氮、蔗糖酶;>60%的指标为有效磷。可见,三个主成分可以解释大部分的土壤属性指标的变异性。一般认为,因子负荷越大,变量在相应主成分中的权重就越大,本研究通过不同开垦年限下土壤质量评价指标的因子负荷量分别计算出其在不同主成分中权重(表4)。

表 3 不同开垦年限土壤质量评价指标的隶属度值

Table 3 Membership values of evaluation indices for grading of soil quality relative to years of reclamation

土壤质量指标 Soil quality index	土层 Soil layer /cm	开垦年限 Reclamation year /a					
		0	<5	10~15	20~25	30~35	50~60
有机质	0~20	0.105	0.392	0.633	0.939	1.000	0.851
Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	20~40	0.000	0.308	0.287	0.599	0.611	0.507
全氮	0~20	0.221	0.181	0.298	0.449	0.593	1.000
Total N / (g·kg ⁻¹)	20~40	0.180	0.035	0.000	0.162	0.353	0.748
速效钾	0~20	0.170	0.190	0.655	0.741	1.000	0.685
Avail K / (mg·kg ⁻¹)	20~40	0.000	0.091	0.493	0.344	0.358	0.250
全盐	0~20	0.535	0.764	0.804	0.883	0.896	1.000
Total salt/ (g·kg ⁻¹)	20~40	0.000	0.481	0.253	0.794	0.835	0.888
速效磷	0~20	0.111	0.089	1.000	0.319	0.743	0.835
Avail P/ (g·kg ⁻¹)	20~40	0.000	0.015	0.012	0.274	0.335	0.402
pH	0~20	0.240	0.479	0.585	0.724	0.249	0.488
	20~40	0.000	0.143	0.751	0.535	0.912	1.000
蔗糖酶	0~20	0.131	0.543	0.336	0.264	1.000	0.817
Invertase/ (mg·g ⁻¹)	20~40	0.006	0.184	0.000	0.255	0.606	0.214
碱性磷酸酶 Alkaline	0~20	0.354	0.600	0.667	0.642	1.000	0.926
phosphatase/ (mg·g ⁻¹)	20~40	0.000	0.137	0.449	0.305	0.446	0.435
容重	0~20	0.980	0.491	0.253	0.632	0.000	0.193
Bulk density/ (g·cm ⁻³)	20~40	0.825	1.000	0.470	0.493	0.108	0.291

表 4 主成分贡献率和土壤质量指标的权重

Table 4 Weights of principal component contribution rate and soil quality indices

土壤质量指标 Soil quality index	第一主成分		第二主成分		第三主成分	
	First principal component		Second principal component		Third principal component	
	负荷量 Capacity	权重 Weight	负荷量 Capacity	权重 Weight	负荷量 Capacity	权重 Weight
有机质 ^① / (g·kg ⁻¹)	0.923	0.133	-0.233	0.081	-0.149	0.067
全氮 ^② / (g·kg ⁻¹)	0.778	0.112	0.208	0.072	0.488	0.219
有效磷 ^③ / (g·kg ⁻¹)	0.646	0.093	-0.588	0.205	0.426	0.191
速效钾 ^④ / (mg·kg ⁻¹)	0.859	0.124	-0.324	0.113	-0.154	0.069
全盐 ^⑤ / (g·kg ⁻¹)	-0.857	0.123	-0.018	0.006	-0.041	0.018
碱性磷酸酶 ^⑥ / (mg·g ⁻¹)	0.932	0.134	-0.069	0.024	-0.057	0.026
蔗糖酶 ^⑦ / (mg·g ⁻¹)	0.772	0.111	0.386	0.134	-0.451	0.202
pH	0.343	0.049	0.841	0.293	0.314	0.141
容重 ^⑧ / (g·cm ⁻³)	0.842	0.121	0.205	0.071	-0.150	0.067
方差贡献率 ^⑨ /%	62.642		16.124		8.827	
累计方差贡献率 ^⑩ /%	62.642		78.593		87.593	

① Organic matter, ② Total N, ③ Available P, ④ Readily Available K, ⑤ Total salt, ⑥ Alkaline phosphatase, ⑦ Sucrose, ⑧ Bulk density, ⑨ Variance contribution rate, ⑩ Cumulative variance contribution rate

2.4 不同开垦年限的 SQI 变化

根据土壤质量综合指数计算公式, 根据隶属度和权重, 计算土壤质量综合指数 (表 5)。

荒地在进行开垦后, 土壤各物质进行积累导致 SQI 随开垦年限的增加而增加 (图 2), 反映了开垦后土壤质量演变的特征, 未开垦荒地 SQI 在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层分别为 0.250 和 0.078, 开垦

<5 a、10~15 a、20~25 a、30~35 a、50~60 a 与未开垦荒地相比, 在 0~20 cm 土层上, SQI 分别提高了 36.70%、89.02%、108.62%、159.56%、161.49%, 在 20~40 cm 土层, SQI 分别提高了 164.44%、212.52%、335.50%、443.45%、444.40%。表明开垦 50~60 年后, 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤质量会明显提高。

表 5 不同开垦年限的土壤质量综合指数

Table 5 Soil quality index relative to years of Reclamation

主成分 Principal component	土层 Soil layer /cm	开垦年限 Reclamation year/a					
		0	<5	10~15	20~25	30~35	50~60
第一主成分 First principal component	0~20	0.317	0.409	0.580	0.627	0.688	0.717
	20~40	0.121	0.282	0.296	0.436	0.547	0.548
第二主成分 Second principal component	0~20	0.317	0.434	0.576	0.648	0.868	0.778
	20~40	0.073	0.240	0.336	0.394	0.515	0.450
第三主成分 Third principal component	0~20	0.163	0.281	0.391	0.445	0.672	0.628
	20~40	0.041	0.121	0.152	0.268	0.439	0.384
土壤质量综合指数 Soil quality index SQI	0~20	0.250	0.342	0.473	0.522	0.649	0.654
	20~40	0.078	0.206	0.244	0.340	0.424	0.425

SQI 在不同开垦期间表现出不同的上升程度, 在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层, 开垦 10~15 a 后, SQI 较开垦初期 (<5a) 分别提高了 38.27% 和 18.18%, 开垦 20~25 a 后较 10~15 a 分别提高了 10.37% 和 39.35%, 30~35 a 较 20~25 a 分别提高了 24.42% 和 24.79%, 50~60 a 较 30~35 a 分别提高了 0.74% 和 0.17%。由于土壤养分的表聚效应, 同一开垦年限 0~20 cm 土层的 SQI 均大于 20~40 cm 土层, 开垦 <5 a、10~15 a、20~25 a、30~35 a、50~60 a 的 0~20 cm 的 SQI 分别较 20~40 cm 提高了 65.69%、93.85%、53.53%、53.08%、86.95%。

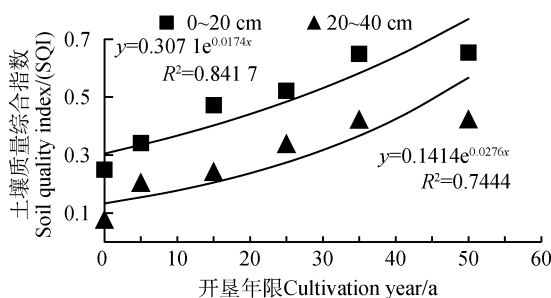


图 2 土壤质量综合指数 (SQI) 随开垦年限的变化

Fig. 2 Variation of soil quality index (SQI) with years of cultivation

3 讨论

在土壤肥力的测量指标中, 评价指标作为一种可度量及测定的土壤属性, 具有良好的参考性。为不影响土壤肥力评价的准确度, 选择正确的评价指标是做好这一评价的前提。因此评价体系中应包括反映土壤物理、化学和生物学特性的指标^[24]。确定土壤质量评价指标体系应满足综合性、主导性、稳定性、精确性和实用性的原则^[25]。单一指标对土壤质量的评价往往存在片面性, 因此在进行土壤质量评价时须考虑土壤功能, 进而选取构建适宜的综合指标体系。土壤容重是评价土壤物理性质的重要指标, 土壤盐分、pH 可反映土壤受胁迫程度与缓冲能力, 土壤有机质、全氮、速效钾、有效磷是植物养分和土壤微生物生命活动的能量来源, 这些养分指标会影响土壤的水分运移、抗侵蚀能力、养分吸收效果以及微生物活性, 可以更加全面的反映开垦对土壤质量的综合影响^[26]。对胶州湾湿地光滩和盐沼土壤^[27]进行质量评价时, 选用了土壤容重、pH、总有机碳、全氮、全磷等指标, 而对环渤海区域土壤^[28]质量进行评价时, 评价指标进行了扩充, 包括了土

壤盐分、pH、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质、全氮、砂粒含量、黏粒含量等多个指标。在众多土壤质量评价研究中,已有学者将物理指标与化学指标相结合来综合反映土壤质量变化情况,但是将物理、化学、生物学指标相结合的研究较为欠缺^[29]。土壤酶是组成土壤生态系统中的重要因子,在土壤学过程和物质循环中发挥着重要的作用,其中土壤蔗糖酶和磷酸酶是最常用的土壤酶活性指标,土壤蔗糖酶参与土壤有机碳转化,其活性强弱反映了土壤肥力水平的重要指标^[30];碱性磷酸酶能反映土壤磷酸的有效性,黄河三角洲土壤作为典型缺磷土壤^[31],碱性磷酸酶可作为反映土壤质量的限制性因子,因此本文在土壤质量评价指标中引入了蔗糖酶和碱性磷酸酶。

研究表明,土壤质量随开垦年限表现出一定的变化规律,总体表现为随开垦年限增加而增加,已开垦样地土壤质量均高于未开垦样地,开垦 30~35 a 后土壤质量趋于稳定。本研究 0~40 cm 层土壤养分及酶活性与土壤质量变化呈现出相似的规律,这是因为荒地经开垦种植作物后,植物根系穿插土壤,改善土壤的物理结构,使土壤孔隙度增加,持水能力增强;土地利用方式的改变打破土壤养分平衡,改变了荒地生态系统封闭的循环模式^[32],开垦耕作后充分的灌溉改善了土壤水分环境,化肥、有机肥投入等农田管理措施增加了土壤有机碳和养分的输入,而且长期施用有机肥有利于改善土壤结构,促进耕层团聚体中全氮及有机氮各组分的积累^[33],作物收获后,大量的秸秆用于秸秆还田,使大量的碳、氮等营养元素积累,随着开垦年限的增加,土壤中营养元素不断增加,这与李易麟和南忠仁^[34]对干旱区土壤养分变化研究结果一致,但与谷海斌等^[35]在对干旱区绿洲的研究中发现土壤养分随开垦年限先降低后升高的结果不同,造成这种结果的原因一方面可能是研究区域不同,土壤母质养分背景差异较大所致,一方面可能跟灌溉施肥措施不同有关;此外,种植作物的种类也会造成土壤养分的差异;随着开垦年限的增加,一方面植物根系的机械作用会影响土壤的容重、孔隙度,另一方面植物通过根系分泌物、叶片和茎秆凋落物改变土壤条件,从而影响微生物的生活环境,直接或间接的增强土壤酶的表达^[36]。土壤中过高的盐分会影响土壤化学和生物过程,降低出苗率、限制作物生长、减少农产品产

量,破坏土壤质量。本研究土壤盐分随开垦年限增加总体呈下降趋势,因为开垦种植作物后,玉米/小麦等大生物量植物在其生长过程中对太阳辐射的遮蔽会减少地表水分蒸发,以缓解盐分向地表运移而造成土壤质量的破坏^[37],这与张寿雨等^[38]对克拉玛依农业开发区的研究结果一致。不同开垦年限 20~40 cm 层土壤质量均低于 0~20 cm,可能与施肥灌溉以及秸秆还田、养分归还引起的养分表聚相关。

4 结 论

本研究以黄河三角洲平均开垦年限分别为 < 5 a、10~15 a、20~25 a、30~35 a、50~60 a 的小麦/玉米连作土地类型为研究对象,运用主成分分析,评价不同开垦年限下土壤质量的变化过程,得出以下结论:荒地开垦 60 年内,土壤质量随开垦年限的增加呈明显上升趋势。土壤质量综合指数上升幅度随开垦年限增加逐渐减少,0~20 cm 土层在开垦 10~15 a 时上升幅度最大,20~40 cm 土层在开垦 5 a 内上升幅度最大,0~40 cm 土层在开垦 30~35 a 后趋于稳定。0~20 cm 土层土壤质量综合指数在不同开垦年限下均高于 20~40 cm。

参考文献 (References)

- [1] Lü Z Z, Liu G M, Yang J S, et al. Synthetic evaluation of soil quality of the coastal saline soil in Yellow River Delta Area[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(6): 93—97. [吕真真,刘广明,杨劲松,等.黄河三角洲滨海盐渍土区土壤质量综合评价[J].干旱地区农业研究,2015,33(6):93—97.]
- [2] Zhang G L, Bai J H, Xi M, et al. Comprehensive assessment of soil quality of wetlands in the Yellow River Delta[J]. *Wetland Science*, 2015, 13(6): 744—751. [张光亮,白军红,郗敏,等.黄河三角洲湿地土壤质量综合评价[J].湿地科学,2015,13(6):744—751.]
- [3] Chi M J, Hou W, Sun Y, et al. Characteristics of soil nutrients and pH value of paddy fields with different planted years in black soil region of northeast China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(3): 546—551. [迟美静,侯玮,孙莹,等.东北黑土区荒地开垦种稻后土壤养分及 pH 值的变化特征[J].土壤通报,2018,49(3):546—551.]
- [4] Lei J, Zhang F H, Lin H R, et al. Soil carbon and nitrogen storage of different reclamation years in salinized wasteland in arid region[J]. *Agricultural Research in the*

- Arid Areas, 2017, 35 (3): 266—271. [雷军, 张凤华, 林海荣, 等. 干旱区盐渍化荒地不同开垦年限土壤碳氮储量研究[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35 (3): 266—271.]
- [5] Wang K, Liu X L, Gao X Y, et al. Effects of different reclamation years on farmland soil physical-chemical properties in carbonate area[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46 (9): 277—280. [王科, 柳小兰, 高晓宇, 等. 碳酸盐岩地区开垦年限对农田土壤理化性质的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(9): 277—280.]
- [6] Wang X J, Gong Z T. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China[J]. Geoderma, 1998, 81 (3/4): 339—355.
- [7] Stocking M A. Tropical soils and food security: The next 50 years[J]. Science, 2003, 302 (5649): 1356—1359.
- [8] Wang Q, Li J, Ning F, et al. Comprehensive assessment of soil fertility characteristics under different long-term conservation tillages of wheat field in Weibei Highland, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29 (9): 2925—2934. [王倩, 李军, 宁芳, 等. 渭北旱作麦田长期保护性耕作土壤肥力特征综合评价[J]. 应用生态学报, 2018, 29 (9): 2925—2934.]
- [9] Jin H F, Shi D M, Chen Z F, et al. Evaluation indicators of cultivated layer soil quality for red soil slope farmland based on cluster and PCA analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (7): 155—164. [金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (7): 155—164.]
- [10] Zheng M N, Liang X Z, Li Y F, et al. Assessment of soil quality of alfalfa field with different growing years in the saline alkali area of northern Shanxi Province[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25 (4): 888—892. [郑敏娜, 梁秀芝, 李荫藩, 等. 晋北盐碱区不同种植年限人工紫花苜蓿草地土壤质量的评价[J]. 草地学报, 2017, 25 (4): 888—892.]
- [11] Hu Q, Chen W F, Wang W Z, et al. Quantitative evaluation for suitability of topsoil stripping of cultivated land occupied by construction[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49 (4): 794—800. [胡琴, 陈为峰, 王文中, 等. 建设占用耕地地表剥离适宜性定量评价研究[J]. 土壤通报, 2018, 49 (4): 794—800.]
- [12] Zhao Y M, Song C S. Scientific research collection of the Yellow River Delta Nature Reserve. Beijing: China Forestry Publishing House, 1995: 13. [赵延茂, 宋朝枢. 黄河三角洲自然保护区科学考察集.北京: 中国林业出版社, 1995: 13.]
- [13] Wang H Y, Li H L, Dong Z, et al. Salinization characteristics of afforested coastal saline soil as affected by species of trees used in afforestation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (3): 706—712. [王合云, 李红丽, 董智, 等. 滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征[J]. 土壤学报, 2015, 52 (3): 706—712.]
- [14] Chen J, Wang S Y, Mao Z P. Monitoring wetland changes in Yellow River Delta by remote sensing during 1976—2008[J]. Progress in Geography, 2011, 30 (5): 585—592. [陈建, 王世岩, 毛战坡. 1976—2008年黄河三角洲湿地变化的遥感监测[J]. 地理科学进展, 2011, 30 (5): 585—592.]
- [15] Li X H, Chen W F, Song X L, et al. Effects of reclamation on distribution of soil carbon and nitrogen in saline soil of the Yellow River Delta[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55 (4): 1018—1027. [李贤红, 陈为峰, 宋希亮, 等. 垦殖对黄河三角洲盐渍土碳氮分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55 (4): 1018—1027.]
- [16] Hong J, Lu X N, Wang L L. Quantitative analysis of the factors driving evolution in the Yellow River Delta wetland in the past 40 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36 (4): 924—935. [洪佳, 卢晓宁, 王玲玲. 1973—2013年黄河三角洲湿地景观演变驱动力[J]. 生态学报, 2016, 36 (4): 924—935.]
- [17] Qiao X J. Study on automatic extraction of coastline in Yellow River delta based on multi-spectral data over the past 50 years[D]. Yantai, Shandong: Ludong University, 2016. [乔学瑾. 基于多光谱数据的最近 50 年黄河三角洲岸线自动提取[D]. 山东烟台: 鲁东大学, 2016.]
- [18] Sun B, Zhao Q G. Evaluation indexes and methods of soil quality concerning red soil degradation[J]. Progress in Geography, 1999, 18 (2): 118—128. [孙波, 赵其国. 红壤退化中的土壤质量评价指标及评价方法[J]. 地理科学进展, 1999, 18 (2): 118—128.]
- [19] Xu M X, Liu G B, Zhao Y G. Assessment indicators of soil quality in hilly Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16 (10): 1843—1848. [许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16 (10): 1843—1848.]
- [20] Lu R K. Analysis methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [21] Xu G H, Zheng H Y. Manual for soil microbial analysis methods. Beijing: Agriculture Press, 1986: 249—291. [许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册.北京: 农业出版社, 1986: 249—291.]
- [22] Guo L L, Sun Z G, Ouyang Z, et al. A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River[J]. Catena, 2017, 152: 135—143.
- [23] Liu X, Wang Y B, Lü M X, et al. Soil quality assessment of alpine grassland in permafrost regions of Tibetan Plateau based on principal component analysis[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40 (3): 469—479. [刘鑫, 王一博, 吕明侠, 等. 基于主成分分析的青藏高原多年冻土区高寒草地土壤质量评价[J]. 冰川

- 冻土, 2018, 40 (3): 469—479.]
- [24] Lin S Y, Li Y, Zhang H M, et al. Assessment on soil fertility quality of slope farmland in Poyang lake area[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2018 (11): 60—63, 67. [林圣玉, 李英, 张华明, 等. 鄱阳湖区坡耕地土壤肥力质量评价[J]. *中国水土保持*, 2018 (11): 60—63, 67.]
- [25] Wang Z L, Fu Q, Jiang Q X. Advances in comprehensive evaluation of soil fertility[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2007, 23 (1): 15—18. [王子龙, 付强, 姜秋香. 土壤肥力综合评价研究进展[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2007, 23 (1): 15—18.]
- [26] Shao G D, Ai J J, Sun Q W, et al. Soil quality status and assessment of different forest types in Kunyushan mountains[J]. *Forest Research*, 2018, 31 (6): 175—184. [邵国栋, 艾娟娟, 孙启武, 等. 昆嵛山不同林分类型土壤质量状况及评价[J]. *林业科学研究*, 2018, 31 (6): 175—184.]
- [27] Xi M, Xian X X, Kong F L, et al. Soil quality evaluation of bare flat and salt marshes in Jiaozhou bay wetlands[J]. *Wetland Science*, 2018, 16 (5): 604—611. [郗敏, 仙旋旋, 孔范龙, 等. 胶州湾湿地光滩和盐沼土壤质量评价[J]. *湿地科学*, 2018, 16 (5): 604—611.]
- [28] Liu G M, Lü Z Z, Yang J S, et al. Quality evaluation of soil in land along Bohai Sea Coast by principal component analysis and GIS[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2015, 33 (1): 67—72. [刘广明, 吕真真, 杨劲松, 等. 基于主成分分析及 GIS 的环渤海区域土壤质量评价[J]. *排灌机械工程学报*, 2015, 33 (1): 67—72.]
- [29] Yu P J, Fan G H, Han K X, et al. Soil quality assessment based on soil microbial biomass carbon and soil enzyme activities[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39 (1): 163—169. [禹朴家, 范高华, 韩可欣, 等. 基于土壤微生物生物量碳和酶活性指标的土壤肥力质量评价初探[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39 (1): 163—169.]
- [30] Shi J G, Liu J H, Xue S X, et al. Effects of Re-used plastic film mulching on soil invertase activity of sunflower[J]. *Crops*, 2015 (4): 85—87. [史建国, 刘景辉, 薛韶霞, 等. 地膜再利用对向日葵田土壤蔗糖酶活性的影响[J]. *作物杂志*, 2015 (4): 85—87.]
- [31] Jiang F C, Wang Y H, Dun X J, et al. Comparative reasearch on several salt-tolerance-related morphological indicators of different tree species in saline lands in Yellow River Delta[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35 (6): 202—206. [姜福成, 王月海, 闾兴建, 等. 黄河三角洲盐碱地不同树种耐盐性形态指标的比较研究[J]. *水土保持通报*, 2015, 35 (6): 202—206.]
- [32] Kong J Q, Du Z Y, Yang R, et al. Evolutionary characteristics of soil organic carbon storage in soil plough layer under a cropland reclamation process in desert oasis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30 (1): 180—188. [孔君洽, 杜泽玉, 杨荣, 等. 荒漠绿洲农田垦殖过程中耕层土壤碳储量演变特征[J]. *应用生态学报*, 2019, 30 (1): 180—188.]
- [33] Li J, Xin X L, Zhu A N, et al. Characteristics of the fraction of organic nitrogen in fluvo-aquic soil aggregates under long-term application of chemical fertilizer and organic manure[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (6): 1494—1501. [李娇, 信秀丽, 朱安宁, 等. 长期施用化肥和有机肥下潮土干团聚体有机氮组分特征[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (6): 1494—1501.]
- [34] Li Y L, Nan Z R. Effects of cultivation on nutrient contents and main properties in desert soil of northwest arid region—A case study in Linze County of Gansu Province[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22 (10): 147—151. [李易麟, 南忠仁. 开垦对西北干旱区荒漠土壤养分含量及主要性质的影响——以甘肃省临泽县为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22 (10): 147—151.]
- [35] Gu H B, Wang Z, Wu H Q, et al. Research on temporal and spatial distribution characteristics of soil nutrient and salt under different reclamation years[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34 (3): 8—15. [谷海斌, 王泽, 武红旗, 等. 不同开垦年限土壤养分和盐分时空分布特征研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34 (3): 8—15.]
- [36] Wall D H. Biodiversity and ecosystem functioning[J]. *BioScience*, 1999, 49 (2): 107.
- [37] Mao Z G, Gu X H, Liu J E, et al. Evolvment of soil quality in salt marshes and reclaimed farmlands in Yancheng coastal wetland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21 (8): 1986—1992. [毛志刚, 谷孝鸿, 刘金娥, 等. 盐城海滨盐沼湿地及围垦农田的土壤质量演变[J]. *应用生态学报*, 2010, 21 (8): 1986—1992.]
- [38] Zhang S Y, Wu S X, He K, et al. Variation of soil salinity in Karamay agricultural development area in different reclamation years[J]. *Soils*, 2018, 50 (3): 574—582. [张寿雨, 吴世新, 贺可, 等. 克拉玛依农业开发区不同开垦年限土壤盐分变化[J]. *土壤*, 2018, 50 (3): 574—582.]

(责任编辑: 檀满枝)