

# 垦殖对黄河三角洲盐渍土碳氮分布特征的影响\*

李贤红 陈为峰<sup>†</sup> 宋希亮 王曼华 胡琴 邓从

(山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018)

**摘要** 以黄河三角洲新生盐碱地为例, 采用空间替代时间的方法, 选取未利用的盐碱地对照 (CK) 和平均开垦年限分别为小于 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, 对 1 m 深土壤碳 (有机碳、无机碳、全碳)、氮 (全氮、碱解氮) 含量进行了分析, 研究不同垦殖年限下土壤碳氮水平和垂直分布特征。结果表明: 垦殖后, 土壤有机碳含量较未垦殖盐碱地均表现为显著提高 ( $p < 0.05$ ); 盐碱地垦殖显著增加了 0~40 cm 土壤的碳储量, 且随垦殖年限增加而增加; 40~100 cm 土层的有机碳含量无趋势性变化规律; 土壤全氮、全碳、无机碳变化与有机碳变化表现出相似规律; 垦殖 30 a 后土壤碳氮养分基本稳定, 表层 (0~40 cm) 含量高于底层 (40~100 cm) 含量; 垦殖年限主要影响 0~30 cm 土壤碱解氮含量; 无机碳作为组成全碳的主要成分, 极易受灌溉和地下水的影响。垦殖虽然显著增加土壤有机碳、全氮含量, 但垦殖后碳氮比 (C/N) 呈降低趋势, 约 30 a 后基本稳定, 不同垦殖年限 C/N 平均为 9.35, 低于全国平均水平, 反映出研究区土壤碳氮养分不均衡问题。

**关键词** 盐渍土; 垦殖年限; 土壤有机碳; 土壤全氮; 碳氮比; 黄河三角洲

**中图分类号** X144 **文献标识码** A

随着土壤资源的日益紧张以及人口数量的剧增, 盐碱土资源利用与改良成为世界性的重大课题之一<sup>[1]</sup>。因此, 研究盐碱地开发利用后的土壤性质变化对指导盐碱地开发具有重要的意义。国内外关于盐渍土开发利用的研究多关注水盐运移及盐分改良<sup>[1-3]</sup>。近年来, 有关盐渍土开发利用的研究集中于土地利用方式以及管理模式<sup>[4-5]</sup>, 研究多关注表层土壤<sup>[6-8]</sup>, 且对垦殖历史的研究较短<sup>[8-9]</sup>, 对于深层次、大时间尺度的农业利用碳氮分布规律研究尚欠缺。黄河三角洲作为中国最年轻的土地, 区域土壤形成发展的历史, 实际就是土地不断被垦殖利用的历史。近年来, 盐碱地开发利用进一步加快, 基于强灌强排的主导治理措施和高潜水位的特征可能会对区域垦殖利用过程中土壤碳变化产生较大的影响。前期, 主要开展了黄河三角洲滨海新生湿地碳氮循环的研究<sup>[10-12]</sup>, 而对盐碱荒地垦殖前后土壤碳行为过程的研究尚未引起足够的重视。土壤无机碳作为碳循环过程的一部分, 紧密联系全球碳循环, 如果忽视无机碳, 不利于精确和正确估算碳储存的变化<sup>[13]</sup>。土地利用方式显著影响土壤无机碳变化过程<sup>[14]</sup>和土壤碳氮等生源要素的耦合关系<sup>[15-16]</sup>。随着黄河三角洲高效经济发展以及“渤海粮仓”建设, 研究大尺度的盐渍土变化特征, 对后续土地利用具有重要的现实指导意义。

本文选取黄河三角洲典型不同垦殖年限土壤为研究对象, 以样地空间变化代替时间动态,

\*国家自然科学基金项目 (31570522) 和山东省重点产业关键技术项目 (2016CYJS05A02) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31570522) and the Key Industry Key Technology Projects of Shandong Province in China (No.2016CYJS05A02)

<sup>†</sup>通讯作者 Corresponding author, E-mail: [chwf@sdau.edu.cn](mailto:chwf@sdau.edu.cn)

作者简介: 李贤红 (1993—), 女, 山东东平人, 硕士研究生, 主要从事盐碱地生态研究。E-mail: [lxh93228@126.com](mailto:lxh93228@126.com)

收稿日期: 2017-12-25; 收到修改稿日期: 2018-04-04; 优先数字出版日期 (www.cnki.net):

系统研究盐碱地垦殖前后及不同垦殖历史典型土层的土壤碳（有机碳、无机碳、全碳）、氮（全氮、碱解氮）的分布特征，阐明变化规律，有利于从整体上准确评估土地利用剧烈变化情景下的土壤碳氮响应过程，为区域土壤碳氮循环模型的建立提供思路和参考数据，还可为区域未利用盐碱地的合理开发与科学管理提供指导，具有重要的理论意义和实践价值。

## 1 材料与方方法

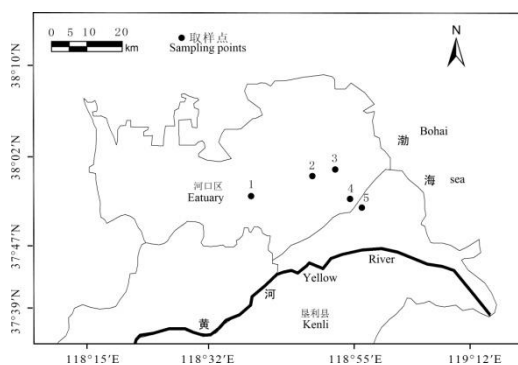
### 1.1 研究区概况

研究区位于黄河三角洲东营市仙河镇，地理坐标 118°35'57"E~118°55'49"E，37°53'20"N~37°56'22"N。选取开垦不同年限的农用地及未垦殖盐碱荒地作为研究样地。该区域年平均气温 13.3℃，平均无霜期 206 d，年均降水量 537 mm，年平均蒸发量 1 885 mm。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。地下水矿化度在空间上分布的总体规律表现为，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 2 g L<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup>，其他大部分地区地下水矿化度大于 10 g L<sup>-1</sup>。研究区灌溉水源来自黄河，灌水方式为大水漫灌，每年平均洗盐灌水量约为 2250 m<sup>3</sup> hm<sup>-2</sup>。

### 1.2 野外调查与土壤样品采集

研究区位于 1934 年海岸线以下，根据成国栋<sup>[17]</sup>对黄河三角洲形成时间研究，黄河三角洲按照形成顺序分为 11 个叶瓣，研究区位于第 9 个叶瓣上，并与第 10、11 叶瓣有所重叠，陆地形成时间约在 1934 年以后。其成土年龄与成土环境接近。1963 年成立军马场开始开发<sup>[19]</sup>，至今盐碱地垦殖历史已超过 50 a，可视为 160 多年以来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。采样区根据土地利用变化研究有关文献<sup>[18]</sup>，以及土地现状图结合实地调查，以未垦殖盐碱荒地作为对照，分别选取 2014 年开发的耕地（垦殖小于 5 a）、2005 年开发的耕地（垦殖约 10~15 a）、1995 年开发的耕地（垦殖约 20~25 a）、1985 年开发的耕地（垦殖约 30~35 a）和 1956 年左右开发的耕地（垦殖约 50~60 a），确定了不同垦殖年限区域土壤进行研究，详见图 1。不同垦殖年限区域基本概况见表 1。

于 2016 年 8 月，选择未垦殖盐碱荒地裸地及垦殖不同年限（小于 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，以其 1 m 深度土壤为研究对象，利用直径 3 cm 土钻采集 0~100 cm 土壤样品。每个垦殖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，每个点面接 0~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm 的 7 个层次进行采样，同时分层取环刀土壤样品。



注：图中编号 1 代表垦殖小于 5 a 取样地，编号 2 代表垦殖 10~15 a 取样地，编号 3 代表垦殖 20~25 a 取样地，编号 4 代表垦殖 30~35 a 取样地，编号 5 代表垦殖 50~60 a 取样地，未垦殖荒地对照为取样区内未垦殖地混合 Note: No. 1: Sample plot less than 5 years in cultivation history; No.2: Sample plot 10~15 years in cultivation history; No. 3: Sample plot 20~25 years in cultivation history; No.4: Sample plot 30~35 years in cultivation history; and No.5: Sample plot 50~60 years in cultivation history; and CK: Uncultivated plot of saline-alkali land

图 1 取样点分布图

Fig.1 Distribution of sampling points

表 1 不同垦殖年限区域概况

Table 1 General information of the sample plots different in cultivation history

垦殖年限 Cultivation history (a)	种植方式 Type of cultivation	平均地下水埋深 Mean groundwater table (m)	平均地下水矿化度 Average groundwater mineralization degree (g L <sup>-1</sup> )
<5	小麦/玉米连作 Wheat and corn continuous cropping	0.96	9.40
10~15	小麦/玉米连作 Wheat and corn continuous cropping	1.36	7.94
20~25	小麦/玉米连作 (近两年玉米单作) Wheat and corn continuous cropping (Corn mono-crops in the last two years)	0.85	10.21
30~35	小麦/玉米连作 Wheat and corn continuous cropping	1.30	6.51
50~60	小麦/玉米连作 Wheat and corn continuous cropping	1.14	8.42

### 1.3 土壤理化性质分析

土样风干，磨细过 0.15 mm 筛，使用元素分析仪 (Elementar Vario Macro, 德国) 测定土壤全氮、全碳<sup>[19]</sup>，使用 1 mol L<sup>-1</sup> 的盐酸去除土样中的碳酸盐后，使用总有机碳分析仪 (Elementar Vario TOC, 德国) 测定土壤有机碳<sup>[20]</sup>，无机碳为全碳与有机碳差减值，并通过气量法验证。土样过 1 mm 筛后，参照《土壤农业化学分析方法》<sup>[21]</sup>，1: 5 土水比浸提液，质量法测定土壤盐分，电位法测定 pH，烘干测定土壤容重，碱解扩散法测定碱解氮，碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定有效磷，火焰光度法测定速效钾。

### 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 处理数据，用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析和显著性分析 (最小显著差异 (LSD) 法检验不同处理的差异性)，相关图表制作使用 Origin 9.0 完成。

## 2 结果

### 2.1 垦殖年限对盐碱地土壤碳的影响

土壤基本理化性状见表 2。通过分析不同垦殖年限土壤有机碳、无机碳和全碳含量的变

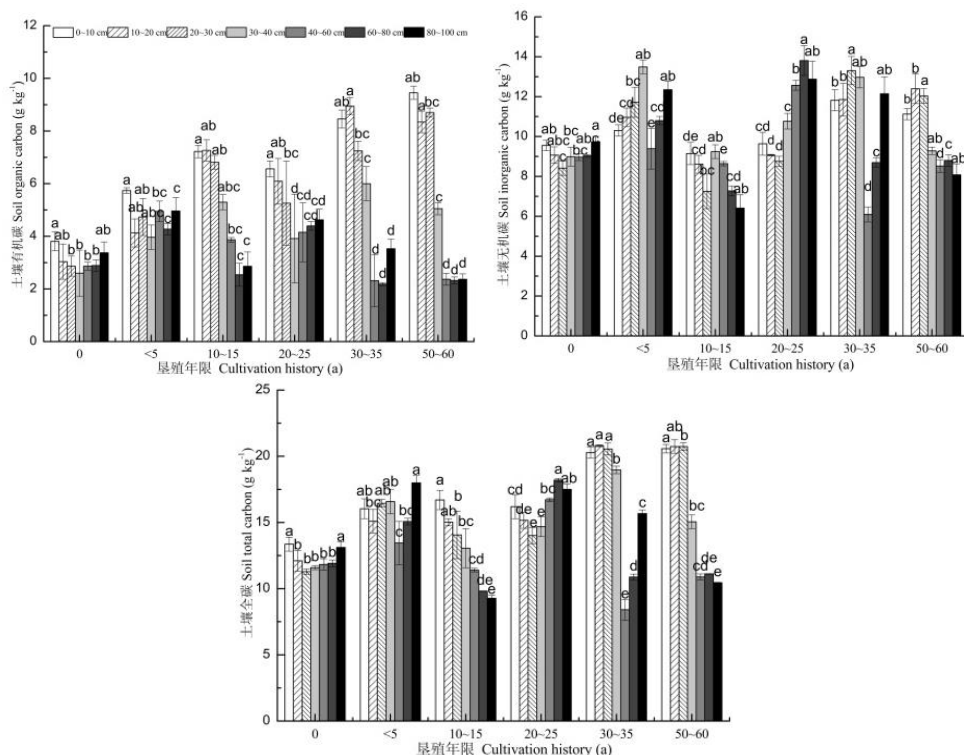
化(图2), 结果发现, 未垦殖荒地对照各土层之间差异不显著 ( $p>0.05$ ), 盐碱地垦殖显著增加 1 m 土体土壤有机碳、无机碳、全碳含量。通过进一步对 1 m 土壤碳含量进行方差分析, 结果发现, 不同垦殖年限土壤有机碳、无机碳、全碳含量均显著高于未垦殖盐碱荒地 ( $p<0.05$ ), 除垦殖 10~15 a 的无机碳, 均随着垦殖年限的增加整体呈增加趋势, 土壤碳(有机碳、无机碳、全碳)含量在垦殖 30~35 a 后达到相对稳定的水平。

通过分析不同垦殖年限土壤有机碳、无机碳和全碳的垂直分布特征, 发现盐碱土垦殖主要影响表层(0~40 cm)碳分布, 随着土层深度的增加该影响降低, 具有一定的表聚性, 40~100 cm 碳含量无明显变化规律。不同垦殖年限 40~100 cm 平均土壤无机碳在一定程度上受地下水埋深(表1)的影响。随着垦殖年限的增加, 直至垦殖 30~35 a 以上, 表层(0~40 cm)土壤有机碳显著高于底层(40~100 cm)土壤有机碳 ( $p<0.05$ )。个别处理(垦殖<5 a、20~25 a)土壤有机碳 40~100 cm 含量显著高于其他处理 ( $p<0.05$ ); 土壤无机碳在垦殖 10~15 a 处理的 0~40 cm 土层出现降低, 在<5 a、20~25 a 和 30~35 a 的深层土壤(40~100 cm)有一定的聚集。

表 2 不同垦殖年限土壤基本理化性状 (0~1 m)

**Table 2** Basic physical and chemical properties of the soil in sample plot relative to cultivation history (0~1 m)

垦殖年限 Cultivation history (a)	土壤容重 Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	pH	全盐含量 Total salt (g kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available Phosphorus (mg kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available Potassium (mg kg <sup>-1</sup> )
未垦殖 Uncultivated	1.60±0.20	8.16±0.27	5.70±4.00	13.88±0.72	62.72±16.48
<5	1.39±0.07	8.16±0.18	2.84±1.12	13.71±0.65	75.67±17.98
10~15	1.45±0.08	8.21±0.12	1.92±1.07	16.83±3.89	108.43±50.70
20~25	1.46±0.06	8.02±0.26	3.60±1.57	16.25±2.12	96.64±27.15
30~35	1.48±0.09	8.44±0.10	1.27±0.63	14.29±1.20	83.95±53.94
50~60	1.53±0.04	8.36±0.15	1.95±0.68	16.31±2.9	75.59±42.99



注: 图中数值为平均值±标准差, 柱形图上不同字母代表相同垦殖年限不同土层含量差异显著( $p<0.05$ ), 下同 The values in the table are means ±SD, and different letters above bars indicate significant difference ( $p<0.05$ ) between different soil depths with the same cultivation history. The same below

图 2 不同垦殖年限不同土层土壤有机碳、无机碳和全碳含量

**Fig.2** Contents of soil organic carbon, inorganic carbon and total carbon in sample plot, relative to cultivation history

## 2.2 垦殖年限对盐碱地土壤氮的影响

不同垦殖年限全氮变化范围在  $0.17\sim 1.27\text{ g kg}^{-1}$  之间, 平均值为  $0.51\text{ g kg}^{-1}$  (图 3A)。通过对 1 m 土层全氮方差分析, 盐碱荒地垦殖后, 全氮含量显著增加, 且随垦殖年限的延长而增加, 具体表现为, 垦殖 20~25、30~35、50~60 a 显著高于 <5、10~15 a。

通过分析土壤全氮垂直变化规律, 结果表明, 随着土层深度的增加, 不同垦殖年限处理全氮均表现降低趋势。未垦殖盐碱荒地 0~10 cm 全氮显著高于 10~100 cm 土层 ( $p<0.05$ )。表层 (0~40 cm) 土壤全氮含量与未垦殖盐碱地相比均显著提高, 随着垦殖年限的增加表聚性特征更加明显 (除 20~25 a), 个别年限 (20~25 a) 全氮含量出现底层 (40~100 cm) 累积现象。垦殖 30 a 后表层 (0~40 cm) 全氮含量显著高于底层 (40~100 cm)。

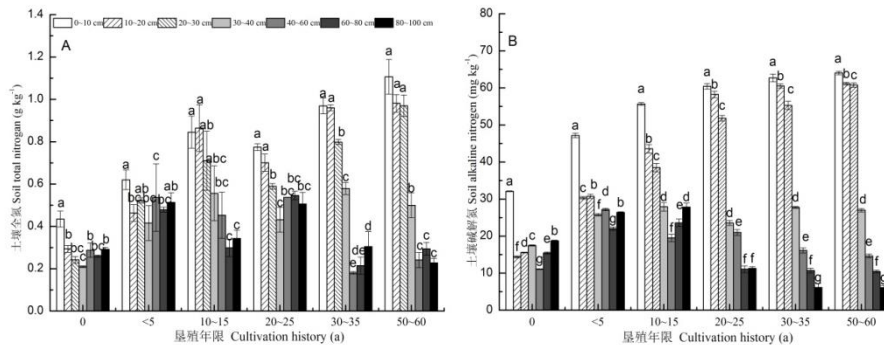


图 3 不同垦殖年限不同土层土壤全氮(A)、碱解氮(B)含量

**Fig.3** Contents of total nitrogen (A) and alkaline nitrogen (B) in sample plot relative to cultivation history

由图 3B 可见, 不同垦殖年限土壤碱解氮平均值为  $30.75\text{ mg kg}^{-1}$ 。垦殖初期, 土壤碱解氮大幅增加, 随着垦殖年限的增加, 碱解氮增幅降低。碱解氮变化规律与全氮变化规律相似。通过对 1 m 土壤碱解氮方差分析发现, 不同垦殖年限处理土壤碱解氮含量显著高于未垦殖盐碱荒地 ( $p<0.05$ ), 具体表现为: 随着垦殖年限的增加 1 m 土体土壤碱解氮含量整体呈增加的趋势; 垦殖年限 50~60 a 有机碳含量显著高于 30~35 a, 30~35 a 显著高于 10~25 a, 10~15 a 显著高于 <5 a。上述结果说明, 盐碱地垦殖后会显著增加 1 m 土壤土体碱解氮含量。

不同垦殖年限处理下, 1 m 土体土壤碱解氮垂直分布特征表现为, 随着土层深度的增加土壤碱解氮含量整体呈降低趋势; 垦殖年限对碱解氮的影响主要作用于表层 (0~30 cm), 荒地 0~10 cm 碱解氮显著高于 10~100 cm; 随着垦殖年限的增加, 至垦殖 10 a 之后 0~30 cm 土壤碱解氮显著高于 30~100 cm ( $p<0.05$ )。底层 (30~100 cm) 土壤碱解氮含量在垦殖初期出现一定程度的增加, 具体表现为, 垦殖初期 5~25 a 增加, 30~60 a 后碱解氮维持在稳定水平。

## 2.3 垦殖盐碱地土壤中碳氮相关性

通过对 0~40 cm 土层有机碳、全氮变化分析 (图 4A), 发现随着垦殖年限的增加, 土壤有机碳、全氮含量均呈增加趋势 (除 20~25 a), 两者之间变化趋势高度一致。本研究发现, 土壤垦殖主要影响 0~40 cm 土壤有机碳、全氮含量。

由图 4B 可以看出, 不同垦殖年限各土层土壤有机碳与全氮呈极显著的 ( $n=126, p<0.01$ ) 线性正相关关系, 且相关系数较高, 二者之间可以用一元线性方程 ( $y=0.1109x-0.0128$ ) 进行拟合。这表明土壤有机碳会促进全氮的增加, 土壤全氮的增加也会促进有机碳的增加, 改

善土壤养分含量，应注重两者之间的相关性。

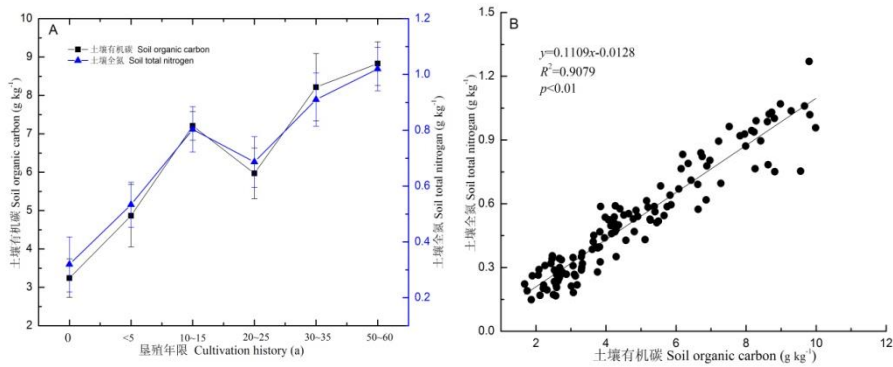


图 4 0~40 cm 土层有机碳、全氮随着垦殖年限的变化 (A) 及其相关性 (B)

Fig.4 Total nitrogen and organic carbon contents in the topsoil layer (0~40cm) of the sample plot relative to cultivation history and their relationship (B)

#### 2.4 垦殖年限对盐碱地土壤碳氮比 (C/N) 的影响

分析土壤 C/N 的变化有助于深入理解土壤有机碳氮的积累过程及土壤质量的变化趋势。由图 5 可知，不同垦殖年限盐碱地土壤碳氮比为 6.56~16.87，垦殖后碳氮比平均值 (9.35) 较未垦殖荒地 (10.89) 有所降低；通过对 1 m 土体 C/N 方差分析，盐碱荒地垦殖后，土壤 C/N 显著降低，C/N 随着垦殖年限的增加出现先降低后稳定的趋势，具体表现为：盐碱荒地开垦后至垦殖 20~25 a，土体 C/N 降低至 8.41，垦殖 30~35 a C/N 维持在稳定水平。根据表层 (0~40 cm) 以及底层 (40~100 cm) 碳氮比方差分析，虽然垦殖后随着垦殖历史的变化 C/N 出现波动，最终 30~35 a 后维持在 9.2 左右。

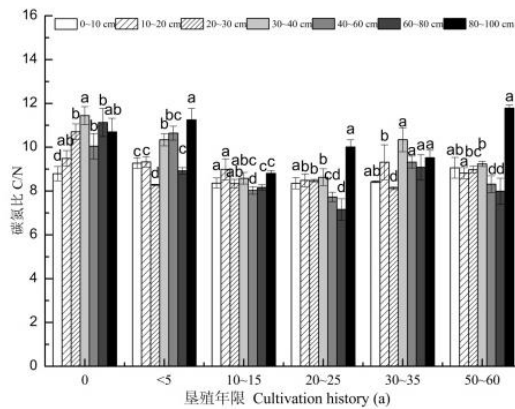


图 5 不同垦殖年限土壤碳氮比

Fig.5 Soil C/N in sample plot relative to cultivation history

### 3 讨论

#### 3.1 不同垦殖年限下盐碱地土壤碳变化的原因

不同垦殖年限 1 m 土体有机碳含量随土层深度的增加而降低，这与夏江宝等<sup>[6]</sup>对 0~40 cm 盐碱地土地利用的研究结果一致。研究发现，不同垦殖年限土壤有机碳含量在 40~100 cm 无显著性变化趋势，该研究结果与李晓光等<sup>[9]</sup>对枸杞、柽柳能够增加 1 m 土体各土层有机碳的研究结果不同，其原因可能是土地利用方式不同，本研究作物为小麦/玉米连作，根系主要分布在表层 (0~40 cm)。40~100 cm 可能是该区域成土母质本身有机碳的含量普遍偏低。

此外, 垦殖年限<5 a、20~25 a 的 40~100 cm 层次有机碳含量显著高于其他处理, 出现深层积累, 其原因可能是垦殖<5 a、20~25 a 的地下水埋深较其他处理浅(表 1), 深层土壤受水文频繁变化的累积影响。

本研究发现, 无机碳占全碳的比重更大, 不同垦殖年限的土壤无机碳、全碳及有机碳具有相似的变化趋势。本研究中, 表层(0~40 cm)无机碳含量显著高于底层(40~100 cm)。该研究结果与邓彩云等<sup>[22]</sup>的研究结果相反, 分析其原因, 一方面可能为区域以及成土母质的差异; 另一方面, 灌溉可能会改变土壤碳输入、输出以及储量, 黄河水作为区域唯一灌溉水源, 无机碳含量高达 35 mg L<sup>-1</sup> 以上<sup>[23]</sup>。垦殖 10~15 a 土壤无机碳较低, 可能是因为该研究区地下水位较深(表 1)。因此, 研究无机碳储量不能脱离土地所属区域的地下水位以及随时间的变化情况等因素, 尤其是以黄河三角洲为代表的高潜水位滨海盐渍土。

### 3.2 不同垦殖年限下盐碱地土壤氮变化的原因

在垂直方向上, 随着土体深度的增加, 各取样点的土壤全氮含量逐渐降低, 这与夏志坚等<sup>[24]</sup>研究结果相似。随着垦殖年限增加, 表层(0~40 cm)土壤全氮含量均表现为提高, 可能是由以下原因共同造成的, 一是土壤垦殖后施肥增加土壤氮含量<sup>[25]</sup>, 增加了全氮的来源; 二是由于植物残体和凋落物输入在土壤表层发生累积<sup>[26]</sup>; 三是氮沉降因素<sup>[27]</sup>。此外, 全氮含量在 40~100 cm 变化不显著, 该结果可能与该区域成土母质中氮含量普遍偏低有关。研究中垦殖年限 20~25 a 的土壤, 有机碳、全氮含量相对其他垦殖年限有所降低, 一方面, 可能由于该区域近两年出现一定程度的撂荒, 种植管理粗放, 秸秆还田量减少; 另一方面, 可能与有机肥的矿化分解有关。

碱解氮是作物易吸收的有效部分<sup>[21]</sup>, 因而与作物在生产过程中从土壤中吸收的氮量相关性显著。土壤碱解氮的测定在农业生产上可直接用来评价土壤的供氮强度, 制定氮肥施用方案。研究表明, 土壤垦殖主要对 0~30 cm 碱解氮有显著影响, 且随垦殖年限的增加而增加。相比于其他养分指标, 更趋表聚化, 其原因可能是垦殖施肥、秸秆还田等田间管理措施会增加碱解氮含量<sup>[28]</sup>。

### 3.3 不同垦殖年限下碳氮相关性及其变化的原因

土壤碳氮之间的耦合关系能更全面地阐述土壤碳氮变异, 土壤 C/N 空间变异特征对区域环境保护与耕地可持续利用意义重大<sup>[27]</sup>。不同垦殖年限 1 m 土壤有机碳与全氮显著线性正相关, 该结果与前人<sup>[29]</sup>研究盐碱地表层土(0~40 cm)碳氮的结果类似, 研究区域各样地各层的 C/N 平均为 9.39, 略低于全国平均水平 10.2<sup>[30]</sup>。土壤 C/N 随垦殖年限增加而逐渐降低, 垦殖 30~35 a 后维持在较低水平, 一方面, 土壤有机碳含量随垦殖年限有所增加, 但在长期采用强排强灌等灌水措施的作用下, 可能增加有机碳淋失; 另一方面可能与氮肥利用率较低有关。

土壤经过不同年限的垦殖, 土壤碳(有机碳、无机碳、全碳)、氮(全氮、碱解氮)、C/N 均在垦殖 30~35 a 后达到相对稳定的水平, 一方面, 可能是由于 20 世纪 80 年代开始大量使用化肥, 前期以有机肥为主, 养分含量低, 另一方面, 可能是由于施肥种植等垦殖方式可改善土壤粒径分布结构, 进而增加土壤的保肥力, 在垦殖 30 a 时均达到相对稳定的水平<sup>[31]</sup>。

本研究主要围绕黄河三角洲区域盐碱地的垦殖年限等状况对碳氮含量分布的影响展开。在研究表层土碳氮分布的同时, 也对深层次的土壤碳氮的垂直分布进行了探索, 土壤垦殖有利于增加土壤碳(有机碳、无机碳、全碳)、氮(全氮、碱解氮)含量, 说明垦殖对黄河三角洲盐渍土土壤养分状况有一定的改良作用。本研究发现, 研究区小麦/玉米连作垦殖 30~35 a 以上, 土壤养分基本维持稳定水平, 但最终表现为 C/N 降低, 因此, 针对区域盐渍土不同垦殖年限的 C/N 状况, 应当通过改善施肥方式、均衡施肥等措施, 提高养分利用率, 使 C/N 维持在利于农业高效利用的水平, 这对于未来黄河三角洲盐渍土垦殖利用、渤海粮仓的建设具有重要的指导意义。

## 4 结论

荒地经垦殖后,土壤有机碳、无机碳、全碳、全氮、碱解氮含量显著提高,且随垦殖利用年限的增加而增加,并在垦殖 30~35 a 后达到相对稳定的水平;1 m 深土体碳氮垂直分布规律具有一定的表聚现象,随土层深度的增加而降低;不同垦殖年限主要影响耕层(0~40 cm)土壤有机碳、无机碳、全碳、全氮,而在 40~100 cm 层次的含量变化不显著;垦殖年限主要影响 0~30 cm 土层碱解氮;地下水埋深对养分深层累积有一定的影响。盐渍土不同垦殖年限土壤有机碳与全氮之间显著正相关,但垦殖后 C/N 呈降低趋势,约 30 a 后基本稳定,C/N 低于全国平均水平,说明长期垦殖土壤亟需进一步提升有机碳含量水平。

## 参考文献

- [1]杨劲松,姚荣江.黄河三角洲地区土壤水盐空间变异特征研究.地理科学,2007,27(3):348-353  
Yang J S, Yao R J. Spatial variability of soil water and salt characteristics in the Yellow River Delta (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(3): 348-353
- [2]Tan J L, Kang Y H. Changes in soil properties under the influences of cropping and drip irrigation during the reclamation of severe salt-affected soils. *Journal of Integrative Agriculture*, 2009, 8(10): 1228-1237
- [3]王曼华,陈为峰,宋希亮,等.秸秆双层覆盖对盐碱地水盐运动影响初步研究.土壤学报,2017,54(6):1395-1403  
Wang M H, Chen W F, Song X L, et al. Preliminary study on effect of straw mulching and incorporation on water and salt movement in salinized soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1395-1403
- [4]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.土壤学报,2015,52(3):706-712  
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 (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 706-712
- [5]米迎宾,杨劲松,姚荣江,等.不同措施对滨海盐渍土壤呼吸、电导率和有机碳的影响.土壤学报,2016,53(3):612-620  
Mi Y B, Yang J S, Yao R J, et al. Effects of farming practice on soil respiration, EC<sub>e</sub> and organic carbon in coastal saline soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3): 612-620
- [6]夏江宝,陈印平,王贵霞,等.黄河三角洲盐碱地不同造林模式下的土壤碳氮分布特征.生态学报,2015,35(14):4633-4641  
Xia J B, Chen Y P, Wang G X, et al. Distribution characteristics of soil carbon and nitrogen under different afforestation modes of saline land in the Yellow River Delta (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4633-4641
- [7]Benbi D K, Brar J S. A 25-year record of carbon sequestration and soil properties in intensive agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, 29(2): 257-265
- [8]侯晓静,杨劲松,赵曼,等.不同施肥措施对滨海盐渍土有机碳含量的影响.土壤,2014,46(5):780-786  
Hou X J, Yang J S, Zhao M, et al. Effects of different fertilization on soil organic carbon in coastal saline soil region (In Chinese). *Soils*, 2014, 46(5): 780-786
- [9]李晓光,郭凯,封晓辉,等.滨海盐渍区不同土地利用方式土壤-植被系统碳储量研究.中国生态农业学报,2017,25(11):1580-1590  
Li X G, Guo K, Feng X H, et al. Carbon storage of soil-vegetation system under different land use patterns in coastal saline region (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(11): 1580-1590
- [10]李远,章海波,陈小兵,等.黄河三角洲内陆到滩涂土壤中碳、氮元素的梯度分布规律.地球化学,2014,



- 43(4): 338-345
- Li Y, Zhang H B, Chen X B, et al. Gradient distributions of nitrogen and organic carbon in the soils from inland to tidal flat in the Yellow River Delta (In Chinese). *Geochimica*, 2014, 43(4): 338-345
- [11]陈为峰, 史衍玺. 黄河三角洲新生湿地不同植被类型土壤的微生物分布特征. *草地学报*, 2010, 18(6): 859-864
- Chen W F, Shi Y X. Distribution characteristics of microbes in new-born wetlands of the Yellow River Delta (In Chinese). *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(6): 859-864
- [12]陈为峰, 史衍玺, 田素锋, 等. 黄河口新生湿地土壤氮磷分布特征研究. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 69-73
- Chen W F, Shi Y X, Tian S F, et al. Study on distribution characteristics of soil nitrogen and phosphorus in new-born wetland of Yellow River Estuary (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(1): 69-73
- [13]祖元刚, 李冉, 王文杰, 等. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性. *生态学报*, 2011, 31(18): 5207-5216
- Zu Y G, Li R, Wang W J, et al. Soil organic and inorganic carbon contents in relation to soil physicochemical properties in northeastern China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5207-5216
- [14]Wu H, Guo Z, Gao Q, et al. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 129(4): 413-421
- [15]周正虎, 王传宽, 张全智. 土地利用变化对东北温带幼龄林土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的影响. *生态学报*, 2015, 35(20): 6694-6702
- Zhou Z H, Wang C K, Zhang Q Z. The effect of land use change on soil carbon, nitrogen, and phosphorus contents and their stoichiometry in temperate sapling stands in northeastern China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20): 6694-6702
- [16]刘兴华, 陈为峰, 段存国, 等. 黄河三角洲未利用地开发对植物与土壤碳、氮、磷化学计量特征的影响. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 204-208
- Liu X H, Chen W F, Duan C G, et al. Effect of exploitation of unutilized land on ecological stoichiometry characteristics of plants and soil carbon, nitrogen and phosphorus in the Yellow River Delta (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2): 204-208
- [17]成国栋. 黄河三角洲现代沉积作用及模式. 北京: 地质出版社, 1991
- Cheng G D. Modern sedimentation and model of the Yellow River Delta (In Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1991
- [18]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. *地理科学进展*, 2011, 30(5): 585-592
- Chen J, Wang S Y, Mao Z P. Monitoring wetland changes in Yellow River Delta by remote sensing during 1976-2008 (In Chinese). *Progress in Geography*, 2011, 30(5): 585-592
- [19]何海龙, 君珊, 张学宽. 总有机碳(TOC)分析仪测定土壤中 TOC 的研究. *分析仪器*, 2014(5): 59-61
- He H L, Jun S, Zhang X K. Analysis of total organic carbon in soil by TOC analyzer (In Chinese). *Analyzer*, 2014(5): 59-61
- [20]李桂花, 叶小兰, 吕子古, 等. 元素分析仪和全自动凯氏定氮仪测定土壤全氮之比较. *中国土壤与肥料*, 2015(3): 111-115
- Li G H, Ye X L, Lü Z G, et al. Comparison of element analyzer (Dumas Combustion) and automated Kjeldahl analyzer (Kjeldahl methods) for determining total nitrogen content in soils (In Chinese). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015(3): 111-115
- [21]鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000

- Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [22]邓彩云, 王玉刚, 牛子儒, 等. 开垦年限对干旱区土壤理化性质及剖面无机碳的影响. 水土保持学报, 2017, 31(1): 254-259
- Deng C Y, Wang Y G, Niu Z R, et al. Effect of land reclamation age on soil physicochemical properties and inorganic carbon in arid areas (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 254-259
- [23]郭兴森, 吕迎春, 孙志高, 等. 黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究. 环境科学, 2015, 36(2): 457-463
- Guo X S, Lü Y C, Sun Z G, et al. Spatial-temporal distributions of dissolved inorganic carbon and its affecting factors in the Yellow River estuary (In Chinese). Environmental Science, 2015, 36(2): 457-463
- [24]夏志坚, 白军红, 贾佳, 等. 黄河三角洲芦苇盐沼土壤碳、氮含量和储量的垂直分布特征. 湿地科学, 2015, 13(6): 702-707
- Xia Z J, Bai J H, Jia J, et al. Vertical distributions of contents and storage of carbon and nitrogen in soils in *Phragmites australis* salt marshes in the Yellow River Delta (In Chinese). Wetland Science, 2015, 13(6): 702-707
- [25]赵丹丹, 王俊, 付鑫. 长期定位施肥对旱作农田土壤全氮及其组分的影响. 水土保持学报, 2016, 30(4): 303-307
- Zhao D D, Wang J, Fu X. Effect of Long-term fertilization on soil total nitrogen and its fractions in dryland farming system (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(4): 303-307
- [26]李龙波, 涂成龙, 赵志琦, 等. 黄土高原不同植被覆盖下土壤有机碳的分布特征及其同位素组成研究. 地球与环境, 2011, 39(4): 441-449
- Li L B, Tu C L, Zhao Z Q, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and its isotopic composition for soil profiles of Loess Plateau under different vegetation conditions (In Chinese). Earth and Environment, 2011, 39(4): 441-449
- [27]王发刚, 王启基, 王文颖, 等. 土壤有机碳研究进展. 草业科学, 2008, 25(2): 48-54
- Wang F G, Wang Q J, Wang W Y, et al. The development of soil organic carbon research (In Chinese). Pratacultural Science, 2008, 25(2): 48-54
- [28]于君宝, 陈小兵, 毛培利, 等. 新生滨海湿地土壤微量营养元素空间分异特征. 湿地科学, 2010, 8(3): 213-219
- Yu J B, Chen X B, Mao P L, et al. The spatial differentiation of soil trace nutrient elements in new-born coastal wetland (In Chinese). Wetland Science, 2010, 8(3): 213-219
- [29]贾佳, 白军红, 高照琴, 等. 黄河三角洲潮间带盐沼土壤碳、氮含量和储量. 湿地科学, 2015, 13(6): 714-721
- Jia J, Bai J H, Gao Z Q, et al. Carbon and nitrogen contents and storages in the soils of intertidal salt marshes in the Yellow River Delta (In Chinese). Wetland Science, 2015, 13(6): 714-721
- [30]潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题. 地球科学进展, 2003, 18(4): 609-618
- Pan G X, Li L Q, Zhang X H, et al. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands (In Chinese). Advance in Earth Sciences, 2003, 18(4): 609-618
- [31]Li J, Pu L, Zhu M, et al. Evolution of soil properties following reclamation in coastal areas: A review. Geoderma, 2014, 226/227: 130-139

## Effects of Reclamation on Distribution of Soil Carbon and Nitrogen

## in Saline Soil of the Yellow River Delta

LI Xianhong CHEN Weifeng<sup>†</sup> SONG Xiliang WANG Manhua HU Qin DENG Cong  
(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

**Abstract** Comparison was made of a tract of virgin saline-alkali soil land (CK) with farmlands different in cultivation history, that is, > 5, 10 ~ 15, 20 ~ 25, 30 ~ 35 and 50 ~ 60 years of wheat or corn mono-cropping, using the space- substituting-time method to explore effects of land cultivation on horizontal and vertical distributions of soil carbon and nitrogen content in the 0 ~ 100 cm topsoil layer of the saline-alkali land in the Yellow River Delta. Results show that land cultivation significantly increased the contents of soil organic carbon, inorganic carbon, total carbon, total nitrogen, and available nitrogen, especially in the topsoil layer, and the effects became more significant with the cultivation going on, but leveled off after 30 years of cultivation. Groundwater table is a factor affecting nutrient accumulation in deep soil layers, to a certain extent. Organic carbon was significantly and positively related to total N, but in farmlands, C/N exhibited a declining trend, which leveled off after 30 years of cultivation. However, the C/N in the farmlands of the region is lower than the average of the country, which indicates that in long-cultivated farmlands, it is still essential to further increase the level of soil organic carbon.

**Key words** Saline soil; Cultivation history; Soil organic carbon; Soil total nitrogen; C/N; The Yellow River Delta

(责任编辑: 陈荣府)