



不同盐渍化程度下滨海盐渍土有机碳矿化规律

郝存抗, 周蕊蕊, 鹿鸣, 王会, 胡国庆

引用本文:

郝存抗, 周蕊蕊, 鹿鸣, 等. 不同盐渍化程度下滨海盐渍土有机碳矿化规律[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(1): 36-42.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0297>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

滨海盐渍区土壤盐分遥感反演及动态监测

张素铭, 赵庚星, 王卓然, 肖杨, 郎坤

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 349-358 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0016>

黄河三角洲典型地区春季土壤水盐空间分异特征研究--以垦利县为例

王卓然, 赵庚星, 高明秀, 姜曙千, 常春艳, 贾吉超

农业资源与环境学报. 2015(2): 154-161 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0293>

玛纳斯河流域土壤盐渍化影响因素研究

郑琦, 王海江, 李万涛, 余露, 邵奇

农业资源与环境学报. 2016, 33(3): 214-220 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0263>

改良剂对柴油污染土壤中黑麦草生理代谢的调节

赵绚, 何兴东, 张京磊

农业资源与环境学报. 2017, 34(4): 384-389 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0306>

秸秆碳对不同施肥水平低肥力土壤碳组分的影响

何振超, 苏瑶, 喻曼, 陈喜靖, 万美霞, 沈阿林

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 304-312 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0120>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郝存抗, 周蕊蕊, 鹿 鸣, 等. 不同盐渍化程度下滨海盐渍土有机碳矿化规律[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(1): 36-42.

HAO Cun-kang, ZHOU Rui-rui, LU Ming, et al. Soil organic carbon mineralization of coastal soils with different salinity levels[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(1): 36-42.

## 不同盐渍化程度下滨海盐渍土有机碳矿化规律

郝存抗, 周蕊蕊, 鹿 鸣, 王 会, 胡国庆\*

(土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

**摘 要:**为探明滨海盐渍土有机碳的矿化特征及控制因子,在黄河三角洲滨海地区距海由远及近的方向上,采集6种不同盐渍化程度的土壤(距海最近的盐渍土BZ1和BZ2为“光板地”盐渍土,BZ3~BZ6均为农田盐渍土)进行室内培养,测定土壤有机碳的矿化速率,分析土壤理化性质、微生物量、细菌真菌比值等指标与土壤有机碳矿化特征的关系。结果表明:滨海盐渍土的盐渍化程度在距海由远及近的方向上呈升高趋势,其中“光板地”盐渍土BZ2的盐渍化程度最大。在255 d的培养期内,各盐渍土有机碳矿化速率随时间的动态变化均为对数函数关系( $P<0.01$ ),表现为培养前期矿化速率较快、中期显著下降、后期趋于平缓,其中“光板地”盐渍土BZ1、BZ2有机碳矿化速率显著小于农田盐渍土BZ3~BZ6( $P<0.05$ )。土壤有机碳累积矿化量随时间的动态变化可以用一级动力学方程拟合( $P<0.01$ ),拟合结果表明,不同盐渍化土壤的潜在可矿化碳( $C_0$ )差异显著,“光板地”盐渍土的 $C_0$ 值显著低于农田盐渍土( $P<0.05$ )。相关性分析表明,土壤有机碳累积矿化量与土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、微生物总量呈显著正相关(相关系数分别为0.975、0.954、0.893),与全盐(TS)呈显著负相关(相关系数为-0.813);土壤TS与SOC、TN和微生物总量呈显著负相关(相关系数分别为-0.838、-0.876和-0.843),而与细菌真菌比值的相关性不显著(相关系数为0.784)。研究表明,不同盐渍化程度下滨海盐渍土的有机碳矿化规律显著不同,土壤盐分可能是通过影响土壤微生物量、碳氮固持能力来控制滨海盐渍土有机碳的矿化特征,而土壤微生物群落结构的变化对土壤有机碳矿化的影响不显著。

**关键词:**黄河三角洲;滨海土壤;盐渍化;有机碳矿化

中图分类号:S153.6

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)01-0036-07

doi: 10.13254/j.jare.2018.0297

### Soil organic carbon mineralization of coastal soils with different salinity levels

HAO Cun-kang, ZHOU Rui-rui, LU Ming, WANG Hui, HU Guo-qing\*

(National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

**Abstract:** In order to accurately evaluate the SOC (soil organic carbon) mineralization characteristics of different salinized soils in the Yellow River delta, and their controlling factors, six salinized soils with different salinization levels (BZ1 and BZ2 were bare land soils, BZ3~BZ6 were farmland soils) were collected from sample sites at different distances from the sea, and the SOC (soil organic carbon) mineralization rate was determined by laboratory thermostatic incubation. The results showed that the salinization levels of the six soils tended to increase in line with the proximity of their respective sample sites to the sea. During the 255-day incubation period, the relationships between mineralization rates of SOC and duration of incubation in all the treatments fitted the logarithmic function equation ( $P<0.01$ ), and the SOC mineralization rates of the bare land soils were much lower than those of the farmland soils ( $P<0.05$ ). The dynamic variation of the cumulative SOC mineralization with incubation time fitted the first-order kinetics equation ( $P<0.01$ ). The simulation results showed that SOC mineralization potentials differed significantly between the different salinized soils, and that SOC mineralization potentials of bare land

收稿日期:2018-10-29 录用日期:2019-03-08

作者简介:郝存抗(1996—),男,山东滕州人,硕士研究生,主要从事土壤碳氮循环研究。E-mail:haocunkang@163.com

\*通信作者:胡国庆 E-mail:gqhu@sdau.edu.cn

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2016DQ05, ZR2017BD012);山东省重大科技创新工程项目(2017CXGC0301);中国博士后科学基金项目(2016M602169, 2018M632702)

**Project supported:** The Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2016DQ05, ZR2017BD012); The Shandong Province Key Scientific and Technological Innovation Projects Program (2017CXGC0301); The China Postdoctoral Science Foundation (2016M602169, 2018M632702)

soils were much lower than those of farmland soils ( $P < 0.05$ ). The correlation analysis showed that SOC mineralization was significantly positively correlated with SOC content, total nitrogen (TN) content, and microbial biomass (correlation coefficient: 0.975, 0.954, and 0.893, respectively), and was significantly negatively correlated with soil total salt content (correlation coefficient: -0.813). There were significant negative correlations between soil total salt content and SOC, and TN and microbial biomass (correlation coefficients: -0.838, -0.876, and -0.843, respectively), while there was no significant correlation between soil total salt content and ratio of bacteria to fungi (correlation coefficient: 0.784). Soil salinity may control SOC mineralization by affecting microbial biomass, or by affecting soil C and N sequestration. However, we did not find any significant influence of microbial community structure on SOC mineralization in this study.

**Keywords:** Yellow River delta; coastal soil; salinization; soil organic carbon mineralization

土壤有机碳库是陆地生态系统最活跃的碳库,其库容大小与土壤肥力、粮食产量和全球气候变化密切相关<sup>[1]</sup>。土壤有机碳矿化是指土壤中活性有机组分通过土壤微生物的分解和利用,支持微生物新陈代谢,并伴随着CO<sub>2</sub>释放的生物学过程<sup>[2]</sup>。因此,土壤有机碳矿化是土壤中的碳重新进入大气的必然过程,是土壤碳循环的重要过程之一,与土壤中养分元素的维持和温室气体的形成密切相关,其释放CO<sub>2</sub>的速率高低及动态变化过程也是反映土壤质量变化的重要指标<sup>[3-4]</sup>。已有研究表明,土壤水分、温度、质地等土壤性质以及外源物料数量、质量等多种因素共同控制着土壤有机碳矿化的速率和进程<sup>[4]</sup>。

土壤盐渍化已成为全世界关注的资源、生态和环境问题之一。我国盐渍化土地面积大且分布广泛,近20%的耕地发生盐渍化<sup>[5]</sup>。土壤盐渍化已成为威胁我国农业可持续发展和生态系统稳定最重要的环境问题<sup>[6]</sup>。滨海盐渍土作为我国盐渍化土的重要组成部分,在土地资源短缺的今天,其改良和可持续利用已成为一项十分紧迫的任务。目前,已有众多学者就滨海盐渍土的改良利用及生态环境问题做了大量细致的研究工作<sup>[6-7]</sup>。但随着对生态环境的重视,全球气候变化与土壤盐渍化的互馈作用也日益受到研究者关注。研究盐渍化程度对土壤有机碳矿化的影响,对于揭示盐渍土碳循环过程及其响应全球气候变化的机理具有重要意义<sup>[8]</sup>。有研究表明,土壤中盐分含量增加会导致土壤渗透压增大,当微生物胞内渗透压远低于胞外渗透压时即会失水死亡,微生物整体活性降低,土壤有机碳矿化速率也随之下降<sup>[9]</sup>。目前,关于盐分状况对土壤有机碳分解、转化以及矿化影响的研究虽有一些报道<sup>[10-11]</sup>,但主要以滨海湿地土壤为研究对象,且以室内添加可溶性盐分处理为主,原位采集不同盐分土壤的研究相对较少。由于土壤有机碳矿化的复杂性和影响因素的多重性,目前针对滨海盐渍土的研究尚难以得出较为系统的结论,因此,不同盐

渍化程度土壤的有机碳矿化特征还有待进一步探讨。

黄河三角洲作为我国乃至世界造陆速度最快的河口三角洲之一,该地区盐渍土类型为滨海盐渍土,其面积占该地区总面积的50%左右,是重要的后备土地资源<sup>[5,10]</sup>。本研究以黄河三角洲不同盐渍化程度的滨海盐渍土为研究对象,通过室内恒温培养,利用碱液吸收法结合动力学方程拟合,探讨不同盐渍化程度下滨海盐渍土有机碳矿化规律,揭示滨海盐渍土有机碳循环特征,以为土壤碳排放潜力的精确评估和模型模拟提供必要的参数,为开展滨海盐渍土的改良利用及生态恢复重建提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

于2016年10月在山东滨州无棣县境内采集土壤样品,根据距离海岸线远近,从东北到西南方向依次设6个采样点(BZ1~BZ6,其中BZ1距海岸线最近,BZ6距海岸线最远),相邻采样点至少相距2 km以上,各采样点的土地利用方式、作物种植模式、肥药施用习惯、灌水习惯尽量保持一致,除重度盐渍化的“光板地”(BZ1和BZ2)外,其他均采自小麦-玉米轮作的地块,供试土壤经纬度及作物种植情况见表1。每个采样点设10 m×40 m样方,样方内“S”型采集10个0~20 cm耕层土壤样品(在两行玉米中间采集以尽量避开作物根系)并充分混匀,混合样带回实验室后,一部分低温存储运输并于-20℃冷冻,待测土壤微生物性质,另一部分风干待用。同时在样方内对角线采集3个原状土壤样品供测田间持水量。风干土壤样品过2 mm筛,并去除植物根系、石砾等杂物。供试土壤基本理化性质见表2。

### 1.2 土壤有机碳矿化培养

称取过2 mm筛的风干土50.0 g于500 mL培养瓶中,用去离子水调节至田间持水量的75%,在25℃培养箱中预培养7 d。预培养结束后将盛有25 mL 0.2

mol·L<sup>-1</sup> NaOH溶液的50 mL吸收杯放置于培养瓶底部,加盖密封,在25℃恒温培养箱中培养。每个样点土壤重复4次,同时设4个空白对照,共28组碳矿化培养微系统。在培养的第0、7、14、28、42、56、70、91、147、175、210、255 d更换碱液吸收杯并补充去离子水,使土壤含水量保持恒定。

### 1.3 测定方法

土壤呼吸:静态碱液吸收法<sup>[12]</sup>。测定定期取出的碱液吸收杯中NaOH溶液剩余量,具体方法:吸取吸收了CO<sub>2</sub>的碱液10 mL,加入1 mol·L<sup>-1</sup> BaCl<sub>2</sub>溶液5 mL,再滴加2滴酚酞指示剂,用0.1 mol·L<sup>-1</sup> HCl(每次滴定前用硼砂进行标定)滴定至红色消失。根据对照组和样点组HCl消耗量之差计算培养期内土壤有机碳的矿化量。

土壤微生物群落特征:磷脂脂肪酸(PLFA)法。前处理采用改进的Bligh-Dyer法<sup>[12]</sup>:用磷酸盐缓冲液-氯仿-甲醇(0.8:1:2)浸提液提取冻干的土壤样品,分离出的PLFA用KOH-甲醇溶液酯化,得到甲基酯化脂肪酸(FAMES)采用Thermo Finnigan Trace GC-MS System测定。以PLFA总量代表微生物群落大小,细菌/真菌比(细菌/真菌,B/F)代表微生物群落结构。

土壤pH值、盐分、有机碳(SOC)、全氮(TN)等其

他理化指标采用常规方法测定<sup>[13]</sup>,结果见表2。

### 1.4 数据处理

土壤潜在可矿化碳采用土壤碳分解的一级动力学方程进行拟合:

$$C_{cum}=C_0 \times (1-e^{-kt})$$

式中: $C_{cum}$ 为某一时间的土壤有机碳累积矿化量,mg C·kg<sup>-1</sup>;  $C_0$ 为土壤潜在可矿化有机碳量,mg C·kg<sup>-1</sup>;  $k$ 为有机碳库的周转速率常数,d<sup>-1</sup>;  $t$ 为培养时间,d。

数据采用SPSS 16.0进行方差、重复测量方差和相关性分析,采用Origin 9.0进行土壤碳分解的一级动力学方程拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同盐渍土的微生物总量及细菌真菌比

PLFA是活体微生物细胞膜的重要组分,各类群的微生物可通过不同的生化途径合成不同的PLFA,PLFA总量相当于微生物量,可反映微生物群落的大小。本研究表明不同盐渍化程度的土壤微生物群落大小有明显差异(图1),其中,有机碳含量最高的样点BZ4的土壤微生物量最大,比样点BZ1、BZ2、BZ5、BZ6分别高出219.6%、218.0%、38.4%、36.2%,差异达到了显著性水平( $P<0.05$ ),但与样点BZ3差异不显著。土壤盐分含量与土壤微生物量呈显著负相关( $r=-0.843, P=0.035, n=6$ ),可能是因为一方面盐分含量高使土壤渗透压大,部分微生物难以适应土壤渗透压高的环境;另一方面盐分含量高导致植被覆盖和土壤碳输入减少,碳源和能源不足降低了土壤微生物数量。

细菌/真菌指土壤微生物中细菌与真菌的相对含量,细菌/真菌的值越大,表明土壤中细菌的相对含量越高。供试土壤中盐分含量最高的BZ2细菌/真菌最大,比样点BZ1、BZ3、BZ4、BZ5、BZ6分别增加24.9%、51.6%、45.9%、37.8%、63.8%(图2),差异均达到了显著水平( $P<0.05$ )。土壤细菌/真菌有随盐渍化程度增

表1 不同盐渍土采样点的位置及种植作物状况

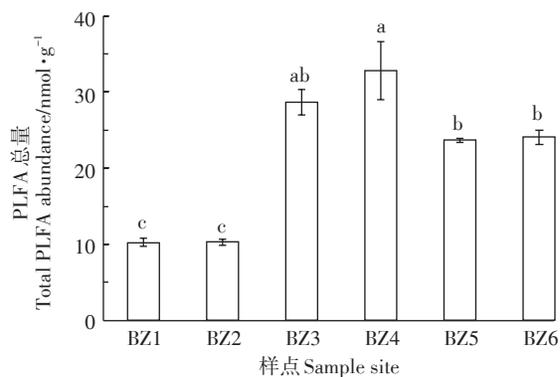
Table 1 Location and crop for the six sample sites

样点 Sample site	纬度(N) Latitude	经度(E) Longitude	海拔 Altitude/m	种植作物 Crop
BZ1	37°56'25.5"	117°57'06.3"	1	无
BZ2	37°56'15.3"	117°57'07.5"	1	无
BZ3	37°55'25.4"	117°56'15.1"	2	玉米
BZ4	37°55'04.7"	117°55'15.5"	2	玉米
BZ5	37°53'48.7"	117°53'28.4"	3	玉米
BZ6	37°46'16.2"	117°54'53.1"	4	玉米

表2 不同盐渍土的基本理化性质

Table 2 Physicochemical properties of sampled soils

样点 Sample site	pH	全盐 Total salt (TS)/g·kg <sup>-1</sup>	有机碳 Soil organic carbon (SOC)/g·kg <sup>-1</sup>	全氮 Total nitrogen (TN)/g·kg <sup>-1</sup>	碳氮比 Ratio of C to N(SOC/TN)	有效磷 Available P (AP)/mg·kg <sup>-1</sup>	有效钾 Available K (AK)/mg·kg <sup>-1</sup>
BZ1	8.81	5.92	6.61	0.66	10.02	34.02	839.70
BZ2	8.89	6.14	5.67	0.63	9.00	31.03	1 000.47
BZ3	8.10	3.90	10.07	1.08	9.32	55.75	699.50
BZ4	8.16	1.85	13.17	1.28	10.29	37.06	742.33
BZ5	7.82	1.92	12.51	1.27	9.85	7.29	415.00
BZ6	8.01	2.01	8.37	0.93	9.00	24.38	251.33



不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下同  
Different lowercase letters indicate significant difference( $P<0.05$ ).  
The same below

图1 不同盐渍土的PLFA总量特征

Figure 1 Total PLFA abundance in different coastal soils with different salinity levels

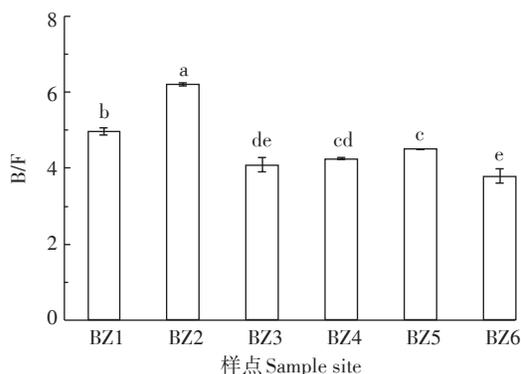


图2 不同盐渍土的细菌真菌比(B/F)

Figure 2 Ratio of bacteria to fungi(B/F) in different coastal soils with different salinity levels

加而增大的趋势,主要是因为细菌更适宜在中性和微碱性环境生存,而真菌更适宜在酸性环境生存。

## 2.2 不同盐渍土有机碳的矿化速率和累积矿化量

经过255 d的室内培养,6种盐渍土有机碳的矿化速率均随培养时间呈下降趋势(图3),其中前期降幅较大,后期趋于平缓,整体符合对数函数关系 $y=a+b\ln x$ ( $P<0.01$ ,表3)。培养第28、175 d和255 d,各土壤的矿化速率分别为第0 d的38.2%~48.4%、20.2%~24.0%和16.3%~19.1%。对比6种盐渍土,培养期间BZ1~BZ6的有机碳平均矿化速率分别为4.36、4.07、7.18、10.63、8.43、5.97  $\text{mg C}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ,BZ3、BZ4、BZ5的矿化速率始终高于BZ1、BZ2、BZ6。

6种盐渍土的有机碳累积矿化量均随培养时间延长而增速变缓,呈饱和效应(图4)。培养到第28 d时,BZ1~BZ6的累积矿化量分别为253、235、420、645、482、372  $\text{mg C}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,占255 d总矿化量的22.5%~

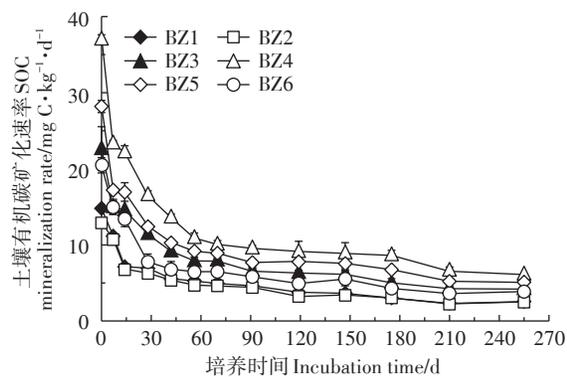


图3 培养期间不同盐渍土有机碳矿化速率

Figure 3 SOC mineralization rate for different coastal soils with different salinity levels during the 255-d incubation

表3 不同盐渍土有机碳矿化速率的回归方程

Table 3 Equations of SOC mineralization rate for different coastal soils with different salinity levels

样点 Sample site	回归方程 Regression equation	$R^2$
BZ1	$y=14.057-2.140 \ln x$	0.943**
BZ2	$y=13.276-2.031 \ln x$	0.932**
BZ3	$y=21.783-3.229 \ln x$	0.978**
BZ4	$y=33.237-5.020 \ln x$	0.950**
BZ5	$y=24.407-3.543 \ln x$	0.957**
BZ6	$y=19.967-3.099 \ln x$	0.909**

注: $y$ -有机碳矿化速率( $\text{mg C}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ); $x$ -培养时间(d);\*\*-在0.01水平上显著相关。

Note: $y$ -SOC mineralization rate ( $\text{mg C}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ); $x$ -Incubation time(d);\*\*-Significant correlation at 0.01 level.

24.4%。培养结束(第255 d)时,6种盐渍土中盐分含量最高、SOC含量最低的BZ2累积矿化量最低,BZ1、BZ3、BZ4、BZ5、BZ6的土壤有机碳累积矿化量分别是BZ2的1.1、1.8、2.6、2.1倍和1.5倍。重复测量方差分析结果表明,土壤类型、培养时间及两者交互作用对土壤有机碳矿化速率和累积矿化量均有显著影响( $P<0.001$ ,表4)。

## 2.3 不同盐渍土有机碳的矿化参数

不同盐渍土有机碳的累积矿化量与培养天数之间的动态变化可以用一级动力学方程 $C_{\text{cum}}=C_0(1-e^{-kt})$ 进行拟合( $P<0.01$ )。拟合结果(表5)表明,不同盐渍化土壤的潜在可矿化有机碳( $C_0$ )差异显著,BZ1、BZ2的潜在可矿化碳量较低,BZ3、BZ4、BZ5的潜在可矿化碳量较高。盐分含量较少的BZ4、BZ5的 $C_0$ 值比盐分含量最高的BZ2分别高159.6%、116.7%,说明盐分是制约潜在可矿化碳的重要因素。各土壤有机碳矿化速率常数( $k$ )的差异未达到显著水平( $P>0.05$ )。

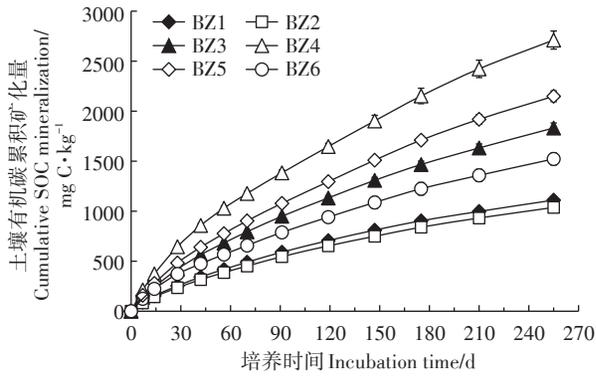


图4 培养期间不同盐渍土有机碳的累积矿化量

Figure 4 Cumulative SOC mineralization for different coastal soils with different salinity levels during the 255-d incubation

表4 土壤有机碳矿化速率和累积矿化量的重复方差分析

Table 4 Repeated measured ANOVA of SOC mineralization rate and cumulative SOC mineralization

项目 Items	土壤有机碳矿化速率 SOC mineralization rate		土壤有机碳累积矿化量 Cumulative SOC mineralization	
	F	P	F	P
S	319.912	<0.001	203.199	<0.001
T	717.745	<0.001	3 237.669	<0.001
S×T	19.302	<0.001	72.378	<0.001

注：S-土壤类型；T-培养时间。

Note：S-Soil type；T-Incubation time.

### 3 讨论

本研究结果表明,随着培养时间的延长,不同盐渍化程度下滨海盐渍土有机碳矿化速率的变化规律一致。在培养初期有机碳矿化速率较快,中期速率下降,后期变化趋于平缓,这与肖颖等<sup>[9]</sup>对辽河口滨海湿地土壤、罗先香等<sup>[11]</sup>对黄河三角洲湿地土壤、杨继松等<sup>[14]</sup>对三江平原草甸沼泽土的研究结果一致。因为土壤中可利用基质的数量是影响土壤有机碳矿化

的主要因素。朱凌宇等<sup>[15]</sup>研究也表明土壤有机碳在矿化时按照易矿化有机碳和惰性有机碳的次序进行,前期易矿化有机碳的数量较多,而后期随着易矿化有机碳数量减少,微生物开始分解难矿化有机碳,而导致矿化减慢。因而土壤有机碳矿化速率表现为前期较快后期缓慢的特点。

各样点盐渍土有机碳矿化速率和累积矿化量依次为BZ4>BZ5>BZ3>BZ6>BZ1>BZ2,相关性分析结果表明土壤有机碳累积矿化量与土壤有机碳、全氮含量呈极显著正相关( $P<0.01$ ,表6)。土壤有机碳是土壤微生物活动的碳源和能源,其与累积矿化量的显著正相关关系已被广泛证实<sup>[16-17]</sup>。罗先香等<sup>[11]</sup>对黄河三角洲芦苇湿地土壤的研究也表明土壤有机碳含量对矿化作用的影响远大于其他因素(如水分和盐渍化程度)。另外,前人研究表明土壤养分含量对土壤有机碳矿化也有显著影响。徐丽等<sup>[18]</sup>在研究青藏高原高寒草地土壤有机碳矿化特征时发现,土壤有机碳矿化量的空间分布与土壤有机碳和全氮含量的空间分布特征一致,并认为土壤有机碳和全氮含量的不同导致土壤微生物种类和地表植被的分异,地表植被的变化引起了凋落物和根系输入量的变化,而微生物的变化影响了其对凋落物的分解,也进一步证实了土壤有机碳和全氮含量与土壤有机碳矿化的关系。唐美玲等<sup>[19]</sup>研究发现添加磷素能促进低磷稻田土壤有机碳的矿化。而本研究中,有效磷、有效钾含量与土壤有机碳矿化量无显著相关性(表6),可能是因为本研究中各盐渍土的有效磷、有效钾含量相对较高,不是有机碳矿化的限制性因子。

盐分含量是滨海盐渍土有机碳矿化的重要影响因素<sup>[20]</sup>。本研究中全盐含量与土壤有机碳累积矿化量呈显著负相关(表6)。Wu等<sup>[21]</sup>研究发现,随着电导

表5 土壤有机碳矿化的一级动力学方程拟合参数

Table 5 First-order kinetics parameters of soil organic carbon mineralization

样点 Sample site	$C_0/mg\ C \cdot kg^{-1}$		$k/d^{-1}$	
	均值	95% 置信区间	均值	95% 置信区间
BZ1	1 336.625c	1 234.577~1 466.535	0.006 6a	0.005 6~0.007 6
BZ2	1 265.279c	1 162.451~1 398.376	0.006 3a	0.005 4~0.007 4
BZ3	2 234.033ab	2 032.383~2 503.715	0.006 3a	0.005 2~0.007 4
BZ4	3 284.129a	2 912.402~3 827.913	0.006 3a	0.004 9~0.007 8
BZ5	2 741.239a	2 458.143~3 136.965	0.005 7a	0.004 6~0.006 9
BZ6	1 837.761b	1 642.849~2 115.032	0.006 4a	0.005 1~0.007 8

注： $C_0$ 表示土壤潜在可矿化有机碳量； $k$ 表示土壤有机碳矿化速率常数。同列不同字母表示样点间差异显著( $P<0.05$ )。

Note： $C_0$  for amount of potentially mineralization C； $k$  for the first-order rate constant. Different letters in the same column indicate significant difference among sample sites( $P<0.05$ ).

表6 土壤基本理化指标与有机碳累积矿化量的相关分析( $r$ )Table 6 Pearson correlations between cumulative SOC mineralization and soil properties( $r$ )

pH	TS	SOC	TN	SOC/TN	AP	AK	PLFA	B/F
-0.720	-0.813*	0.975**	0.954**	0.557	-0.039	-0.316	0.893*	-0.579

注:\*\*表示极显著相关( $P<0.01$ ),\*表示显著相关( $P<0.05$ )。下同。

Note:\*\* indicates significant correlation at  $P<0.01$  level,\* indicates significant correlation at  $P<0.05$  level. The same below.

率的增加,土壤有机碳矿化呈下降趋势;Nelson等<sup>[22]</sup>研究表明,盐分的增加会导致有机物分解速率下降;肖颖等<sup>[9]</sup>对滨海湿地土壤的研究表明在较高盐度范围内土壤盐分与有机质的矿化之间存在负相关关系。一般认为,在盐渍土中盐度对有机碳矿化作用的影响主要表现在土壤溶液中高盐度产生的较低渗透势对微生物数量和活性的抑制作用,从而减弱了土壤有机碳的矿化作用。本研究中盐渍土的盐分含量与土壤微生物量(PLFA总量)呈显著负相关(表7)即验证了这一点。相关性分析表明,滨海盐渍土可能主要通过盐渍化程度改变土壤微生物总量和碳氮固持能力来影响有机碳矿化特征;而各盐渍土细菌真菌比(B/F)与有机碳矿化量不存在显著的相关关系(表6),说明本研究中土壤微生物群落结构变化对滨海盐渍土有机碳矿化的影响不大。

表7 土壤基本理化指标与盐分的相关分析( $r$ )Table 7 Pearson correlations between soil properties and salt content( $r$ )

SOC	TN	SOC/TN	AP	AK	PLFA	B/F
-0.838*	-0.876*	-0.204	0.338	0.792	-0.843*	0.784

综上,盐分含量和微生物总量对滨海盐渍土有机碳矿化具有重要影响。然而,尽管有研究指出土壤微生物数量对盐分胁迫反应非常敏感,高盐度会使其受到明显抑制<sup>[23-24]</sup>,但也有研究指出盐分含量对土壤微生物量的影响存在一个临界值,低于这一临界值微生物的数量会随着盐分的增加而增加,而超过这一值微生物的数量随着盐分的升高而降低<sup>[10-11]</sup>。因此,土壤盐分含量、微生物总量与有机碳矿化之间可能存在较为复杂的关系。肖颖等<sup>[9]</sup>研究表明,在低盐度范围内盐分上升可以提高滨海湿地土壤微生物数量和活性而使有机碳矿化能力提高;而在高盐度范围内,盐度过高导致土壤微生物胞外渗透势的降低,可能使微生物数量和活性下降,从而使碳矿化能力下降。但是,目前盐分对有机碳矿化能力影响的临界值还未能确定,潜在的微生物影响机制有待进一步研究。

## 4 结论

(1)黄河三角洲滨海盐渍土的盐渍化程度在距海由远及近的方向上呈升高趋势。在255 d的培养期内,不同盐渍化程度下土壤有机碳矿化速率均表现为培养前期速率较快、后期缓慢的动态特征,有机碳矿化速率、累积矿化量随盐渍化程度的增加而降低。

(2)土壤有机碳、全氮、全盐含量及微生物总量与土壤有机碳矿化速率、累积矿化量密切相关。土壤有机碳矿化量与土壤有机碳、全氮含量及微生物总量呈显著正相关(相关系数分别为0.975、0.954、0.893),而与全盐含量呈显著负相关(相关系数为-0.813)。

(3)滨海盐渍土可能主要通过盐渍化程度改变土壤微生物总量和碳氮固持能力,而微生物群落结构对土壤有机碳矿化速率、累积矿化量、潜在可矿化有机碳量等矿化指标影响不大。

## 参考文献:

- [1] Schmidt M W, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, 478(7367):49-56.
- [2] Feller C, Beare M H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics[J]. *Geoderma*, 1997, 79:69-116.
- [3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):7-20.
- [4] 郭振,王小利,段建军,等.长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1):225-235.  
GUO Zhen, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, et al. Long-term fertilization and mineralization of soil organic carbon in paddy soil from yellow earth[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(1):225-235.
- [5] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5):837-845.  
YANG Jin-song. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):837-845.
- [6] 王佳丽,黄贤金,钟大洋,等.盐碱地可持续利用研究综述[J]. *地理学报*, 2011, 66(5):673-684.  
WANG Jia-li, HUANG Xian-jin, ZHONG Tai-yang, et al. Review on sustainable utilization of salt-affected land[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5):673-684.
- [7] 李建国,濮励杰,朱明,等.土壤盐渍化研究现状及未来研究热点

- [J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1233-1245.
- LI Jian-guo, PU Li-jie, ZHU Ming, et al. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1233-1245.
- [8] Rath K M, Rousk J. Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling: A review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 81: 108-123.
- [9] 肖颖, 杨继松. 辽河口滨海湿地土壤有机碳矿化及其与盐分的关系[J]. 生态学杂志, 2015, 34(10): 2792-2798.
- XIAO Ying, YANG Ji-song. Soil organic carbon mineralization and its relation with salinity in coastal wetland of Liaohe estuary[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(10): 2792-2798.
- [10] 李玲, 仇少君, 檀菲菲, 等. 盐分和底物对黄河三角洲区土壤有机碳分解与转化的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(21): 6844-6852.
- LI Ling, QIU Shao-jun, TAN Fei-fei, et al. Effects of salinity and exogenous substrates on the decomposition and transformation of soil organic carbon in the Yellow River delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(21): 6844-6852.
- [11] 罗先香, 张贺, 贾红丽, 等. 黄河三角洲滨海湿地土壤有机碳矿化过程模拟研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(6): 1-7.
- LUO Xian-xiang, ZHANG He, JIA Hong-li, et al. The simulation study of soil organic carbon mineralization in Yellow River delta wetlands, China[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(6): 1-7.
- [12] Wang Q, Wang S, He T, et al. Response of organic carbon mineralization and microbial community to leaf litter and nutrient additions in subtropical forest soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 71: 13-20.
- [13] 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.
- LU Ru-kun. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [14] 杨继松, 刘景双, 孙丽娜. 温度、水分对湿地土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(1): 38-42.
- YANG Ji-song, LIU Jing-shuang, SUN Li-na. Effects of temperature and soil moisture on wetland soil organic carbon mineralization[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(1): 38-42.
- [15] 朱凌宇, 潘剑君, 张威. 祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 668-675.
- ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei. Study on soil organic carbon pools and turnover characteristics along an elevation gradient in Qilian Mountain[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(2): 668-675.
- [16] Hopkins D W, Sparrow A D, Elberling B, et al. Carbon, nitrogen and temperature controls on microbial activity in soils from an Antarctic dry valley[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 3130-3140.
- [17] 吴萌, 李忠佩, 冯有智, 等. 长期施肥处理下不同类型水稻土有机碳矿化的动态差异[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1705-1714.
- WU Meng, LI Zhong-pei, FENG You-zhi, et al. Dynamic differences of organic carbon mineralization in different types of paddy soil under long-term located fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(9): 1705-1714.
- [18] 徐丽, 于书霞, 何念鹏, 等. 青藏高原高寒草地土壤碳矿化及其温度敏感性[J]. 植物生态学报, 2013, 37(11): 988-997.
- XU Li, YU Shu-xia, HE Nian-peng, et al. Soil C mineralization and temperature sensitivity in alpine grasslands of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(11): 988-997.
- [19] 唐美玲, 魏亮, 祝贞科, 等. 稻田土壤有机碳矿化及其激发效应对磷添加的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 857-864.
- TANG Mei-ling, WEI Liang, ZHU Zhen-ke, et al. Responses of organic carbon mineralization and priming effect to phosphorus addition in paddy soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(3): 857-864.
- [20] Setia R, Gottschalk P, Smith P, et al. Soil salinity decreases global soil organic carbon stocks[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 465(6): 267-272.
- [21] Wu Y, Tam F Y N, Wong M H. Effects of salinity on treatment of municipal wastewater by constructed mangrove wetland microcosms[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 57(6): 727-734.
- [22] Nelson P N, Ladd J N, Oades J M. Decomposition of  $^{14}\text{C}$ -labelled plant material in a salt-affected soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 433-441.
- [23] 周玲玲, 孟亚利, 王友华, 等. 盐胁迫对棉田土壤微生物数量与酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 241-246.
- ZHOU Ling-ling, MENG Ya-li, WANG You-hua, et al. Effects of salinity stress on cotton field soil microbe quantity and soil enzyme activity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 241-246.
- [24] 郑智, 刘琛, 傅庆林, 等. 盐分和水分对滨海盐土微生物组成及多样性的影响[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(2): 240-248.
- ZHENG Zhi, LIU Chen, FU Qing-lin, et al. Effects of salinity and soil moisture on microbial composition and community diversity in a coastal saline soil[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2015, 27(2): 240-248.