

黄河三角洲废弃盐田复垦土壤碳氮磷生态化学计量学特征

朱奕豪^{1,2}, 刘晓丽³, 陈为峰^{1,2}, 宋希亮^{1,2}, 林雪婷¹, 牛旭昌¹, 刘萍⁴

(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 250000; 4.寿光市自然资源和规划局, 山东 寿光 262799)

摘要: 选取黄河三角洲废弃盐田复垦1,2,3,4,7,8,9年7个复垦年限及农田(非复垦形成)0—100 cm 土层土壤为研究对象,通过测定复垦土壤有机碳(SOC)、总氮(TN)、总磷(TP)含量,分析不同复垦年限及农田土壤养分时空变异格局及化学计量学特征,并同步测定土壤理化性状、酶活性,计算土壤C、N、P 储量。结果表明:废弃盐田复垦1,2,3,4,7,8,9年0—100 cm 土层土壤SOC、TN 含量远低于全国平均水平;复垦1,2年0—100 cm 土层土壤TP 含量低于全国平均水平,复垦3,4,7,8,9年土壤TP 含量持平或略高于全国平均含量。随复垦年限的增加,土壤SOC、TN 含量及N/P 先降低后升高,C/N 先升高后降低,C/P 在复垦7年后持续升高,0—20 cm 土层C、N、P 储量不断增加,而TP 含量则表现为波动变化的特征。随土层深度增加,土壤TP 含量及除复垦1年外的土壤TN 含量先升高后降低,C/N 持续增加,N/P 持续降低,而不同复垦年限土壤SOC 含量、C/P 仅在0—40 cm 土层具有明显的垂直变化规律。不同复垦年限0—20, 20—40 cm 土层土壤SOC、TN、TP 与土壤容重呈显著负相关,与脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶呈极显著或显著正相关,土壤C 储量与C/N、C/P 呈极显著正相关。相关性分析还表明,土壤SOC、TN 含量是调控复垦土壤生态化学计量比的主要因素。

关键词: 废弃盐田; 复垦土壤; 生态化学计量学; 黄河三角洲

中图分类号: S156.4⁺2; S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)06-0352-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.049

Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Reclaimed Area of Abandoned Salt Pan in the Yellow River Delta

ZHU Yihao^{1,2}, LIU Xiaoli³, CHEN Weifeng^{1,2}, SONG Xiliang^{1,2},

LIN Xueting¹, NIU Xuchang¹, LIU Ping⁴

(1.College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018;

2.Shandong Engineering Research Center of Plant-Microbial Restoration for Saline-alkali Land,

Tai'an, Shandong 271018; 3.Shandong Province Center for Land Comprehensive Improvement and

Service, Jinan 250000; 4.Shouguang Natural Resources and Planning Bureau, Shouguang, Shandong 262799)

Abstract: Taking 0—100 cm soils from the farmlands (not reclamation formation) and reclamation areas of 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9 years old in the Yellow River Delta as study objects, the spatiotemporal distribution and stoichiometry characteristics were analyzed through analyzing the soil organic carbon (SOC), nitrogen (TN), and phosphorus (TP), meanwhile the soil physiochemical and enzyme activities properties were examined and the C, N, and P storage were calculated. The results showed that the average values of SOC and TN in different soils of reclamation years were lower than the national average level. The TP level was lower than the national average level in the reclamation soil of 1 and 2 years, and was the same or slightly higher than the national average level in the reclamation soil of 3, 4, 7, 8, and 9 years. With the increasing of the reclamation years, the content of SOC, TN, and N/P decreased firstly and then increased, but C/N increased firstly and then decreased, C/P showed increasing trends after 7 years of reclamation, C, N, and P storage were increasing in 0—20 cm soil layer of different reclamation years, while the change rule of TP was fluctuating. With the increase of soil depth, the content of TP and TN, except in the first year, after reclamation increased firstly and then decreased in soil profiles, C/N increased and N/P decreased, the SOC contents and C/N showed significant vertical variation in the 0—40 cm soil layer. The values of SOC, TN, and TP showed significant

收稿日期: 2020-03-27

资助项目: NSFC-山东省联合基金重点项目(U1906221); 山东省重大科技创新工程项目(2018CXGC0307)

第一作者: 朱奕豪(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事退化土壤生态治理研究。E-mail: yihao3344lin@163.com

通信作者: 陈为峰(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事退化土壤生态治理及土地整治生态工程研究。E-mail: chwf@sdau.edu

negative correlations with soil conductivity and extremely significant or significant positively correlations with soil urease, alkaline phosphate, and invertase activity in 0—20 cm and 20—40 cm soil layer. C storage was extremely significantly correlated with C/N and C/P. The correlation analysis also showed that soil SOC and TN were the main factors regulating the soil eco-stoichiometry ratio of reclamation soils.

Keywords: abandoned salt pan; reclaimed soils; ecological stoichiometry; Yellow River Delta

生态化学计量学将不同层次的元素水平统一起来,从元素比率的角度出发,结合化学、生物学与生态学的基本原理^[1-2],已成为研究生物地球化学循环及其有效性的重要工具,受到国内外学者的广泛关注。土壤作为生态系统养分循环的重要调节者^[3],对植物生长具有重要的影响,因此,对土壤养分的生态化学计量学特征进行研究有助于掌握土壤质量现状,对探明土壤养分间的耦合关系与平衡机制具有重要意义^[4-6]。

黄河三角洲沿海区域分布有盐田 9.14 万 hm²,占山东省盐田总面积的 76.0%,是山东省乃至全国盐业的重要产区^[7-10]。据初步调查,山东省目前废弃盐田约 6 666.67 hm²,而且面积仍在不断增加之中。盐田废弃后,杂草丛生,不仅生态环境恶化,还造成资源严重浪费。面对我国人口基数大、粮食需求多的实情,土地复垦已成为解决土地资源短缺和落实“藏粮于地”战略的重要举措。研究区域经历了“农田—盐田—农田”的生产过程,与荒地、盐碱地等土地开垦的性质不同,在这种独特的环境条件下,复垦土壤营养元素生物地球化学循环过程必然有其特殊规律。

目前,有关土壤 C、N、P 元素组成及生态化学计量特征研究主要集中在森林^[5,11-13]、湿地^[2,14-15]、草地^[3,16]和山地^[1,17]等自然生态系统,较少涉及与自然生态系统成土过程不同的土地复垦土壤。而对黄河三角洲生态化学计量特征的研究也主要集中在人工林地^[18]、新生湿地^[19]、未利用地^[20]及自然保护区土壤^[21]等土地类型,对废弃盐田复垦地的研究也鲜有报道。近几年,研究人员^[9-10]更多关注于废弃盐田复垦后土壤盐分与有机质的时空变化。因此,本文以黄河三角洲废弃盐田不同复垦年限 0—100 cm 土层土壤为研究对象,测定其 SOC、TN、TP 含量、基本理化性状和酶活性,计算生态化学计量比及 C、N、P 储量,旨在分析:(1)废弃盐田复垦土壤 C、N、P 元素含量及化学计量比垂直分布特征;(2)复垦年限及土壤特性对土壤 C、N、P 元素含量及化学计量比的影响;(3)土壤生态化学计量比与土壤 C、N、P 储量的相关性。这对于在环境问题日益严重、土地资源日益短缺和土壤质量趋向恶化的情况下,滨海废弃盐田复垦土生物地球化学循环的研究具有重要意义,研究结果可以揭示黄河三角洲废弃盐田土壤生态化学计量特征及其随复垦年限的变化规律,以期为指导复垦土地合理开发,提高其土壤质量提供一定的科学参考,有助于加深对复垦土壤 C、N、P 地球化学循环特征的认识,并为复垦土壤 C、

N、P 储量的估算提供准确的数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于黄河三角洲寿光清水泊农场(36°31′38.4″—37°64′42.2″N,119°11′27.0″—119°15′2.4″E)(图 1),属暖温带季风区大陆性气候,年平均气温为 12.7℃,年平均降水量为 400~500 mm,降雨多集中在 6—8 月。研究区土壤类型均为盐化潮土,土种均为壤质重度卤化物盐化潮土,土壤质地类型以粉砂壤土为主,间有砂质壤土、黏壤土。研究区内农作物以种植高粱、棉花、玉米、小麦为主,灌溉水源来自寿光污水处理厂,水源充足,土地平整后一般需漫灌 2 次。从内地至沿海地下水矿化度逐渐增加,沿海地带地下水矿化度可达 11~12 g/L。所选项目区均是 1988 年开发为盐田,经过 20 多年的开采,地下卤水卤度不断降低,开采成本持续升高,经济效益下滑,加之受宏观经济政策影响,原盐滞销,致使大量盐场经营困难,随之破产。土地复垦工程的开展为废弃盐田土地资源再利用找到一条很好的出路,自 2010 年第 1 批复垦工作开展,随后相继复垦了 6 批(初始复垦时间分别为 2011 年、2012 年、2015 年、2016 年、2017 年和 2018 年),除 2018 年复垦区未种植作物外,其余复垦区均于复垦当年种植作物,所选复垦区土地利用方式均为高粱,高粱均为机械播种,粗放式管理。

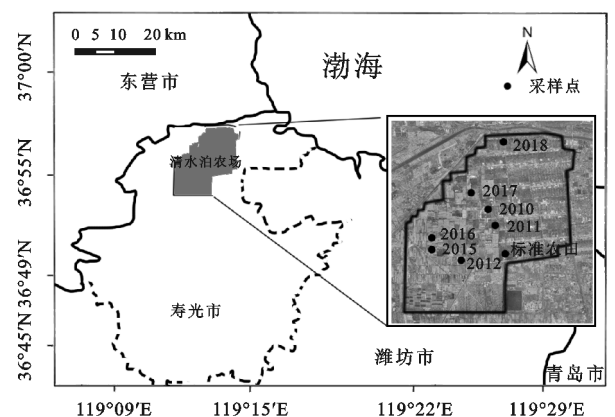


图 1 研究区位置及采样点分布

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与处理 本研究原位采样时间为 2018 年 9 月底至 10 月上旬,选择寿光清水泊农场复垦 1 年(RT1)、2 年(RT2)、3 年(RT3)、4 年(RT4)、7 年(RT7)、8 年(RT8)及 9 年(RT9)复垦项目区废弃盐田土壤进行取样,加上农田(RTBL,一直为耕地,非复垦形

成)共 8 个典型地块样地,利用直径 3 cm 的土壤采样器在各项目区内随机采集原状土壤剖面,每个项目区采用五点取样法,采样深度为 100 m,分 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 5 层取样,同一项目区内五点取样后相同土层的均匀混合,现场将采集的土样挑出植物、细根、碎石等杂物并分别装入编号自封袋中保存,土样运回实验室后,放置于阴凉通风处自然晾干,分别过 2.0,149 mm 网筛供室内分析使用。

1.2.2 样品测定方法 本试验于 2018 年 10 月至 2019 年 3 月在山东农业大学资源与环境学院草地与环境生态实验室进行。采用体积为 100 cm³ 环刀钻取原状土壤于 105 ℃ 烘干法测定土壤容重,烘干法测定土壤含水率,烘干残渣法测定土壤盐分;电极电位法测定土壤 pH,重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳,半微量凯氏法(KDY—9830)测定土壤全氮,高氯酸—硫酸消解钼锑抗比色法(UV—2450)测定土壤全磷,苯酚—次氯酸钠比色法测定土壤脲酶;磷酸苯二钠比色法测定土壤碱性磷酸酶,3,5—二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖酶。

1.2.3 土壤 C、N、P 储量计算方法 土壤表层剖面单位面积一定深度 C、N、P 储量(T_c)(t/km²)的计算

公式为:

$$T_c = \sum D \times M \times d \times 10$$

式中: D 为土壤表层容重(g/cm³); M 为土壤表层碳、氮、磷含量(g/kg); d 为土层深度(cm)。

1.2.4 数据处理与分析 运用 Microsoft Excel 2007 对测定数据进行整理,Origin 8.0 软件绘图。不同复垦年限废弃盐田土壤各理化因子间的差异性检验、相关关系使用 SPSS 22.0 软件中的方差分析(ANOVA)、Pearson 相关分析进行统计分析。土壤碳氮磷均采用质量含量,碳氮比(C/N)、碳磷比(C/P)和氮磷比(N/P)均采用质量比。

2 结果与分析

2.1 土壤环境因子特征

表 1 为黄河三角洲废弃盐田复垦土壤基本理化因子与酶活性时空变化特征。

从表 1 可以看出,土壤 pH、脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶在不同土层整体表现为随复垦年限的增加而递增,而含盐量、含水率、容重则相反;0—20 cm 土层容重的变化范围为 1.48~1.71 g/cm³,RTBL 最低,RT1 最高。

表 1 废弃盐田复垦土壤理化及酶活性特征

复垦 年限	土层 深度/cm	土壤理化特征				土壤酶活性		
		pH	含盐量/ (g·kg ⁻¹)	含水率/%	容重/ (g·cm ⁻³)	脲酶/ (μg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	碱性磷酸酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	蔗糖酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)
RTBL	0—20	7.73±0.08ab	0.62±0.01f	12.48±0.02cd	1.48±0.09b	3.15±0.15a	3.62±0.06a	9.43±0.18a
	20—40	7.84±0.05a	0.58±0.03f	11.34±0.01d	1.39±0.07b	2.73±0.11a	3.10±0.11a	8.75±0.13a
RT9	0—20	7.83±0.15a	0.56±0.03f	11.69±0.01cd	1.54±0.07b	2.35±0.19b	3.37±0.04b	8.62±0.21b
	20—40	7.87±0.11a	0.67±0.01f	14.20±0.01cd	1.58±0.08a	2.15±0.13ab	2.95±0.04a	8.34±0.22ab
RT8	0—20	7.60±0.18abc	0.65±0.01f	11.17±0.01d	1.52±0.03b	2.28±0.48b	3.26±0.01b	8.52±0.16b
	20—40	7.70±0.27a	0.68±0.02f	12.07±0.02d	1.54±0.03ab	1.91±0.44b	2.51±0.01bc	7.73±0.15b
RT7	0—20	7.67±0.10ab	0.94±0.03e	14.98±0.01bc	1.57±0.09b	2.34±0.33b	3.03±0.14c	8.57±0.34b
	20—40	7.78±0.06a	0.95±0.03e	18.03±0.01ab	1.59±0.10a	1.71±0.19b	2.66±0.03b	8.08±0.19b
RT4	0—20	7.72±0.37abc	1.85±0.06d	16.43±0.01b	1.55±0.10b	2.26±0.15b	2.76±0.02d	7.64±0.14c
	20—40	7.64±0.31a	2.02±0.03d	18.10±0.01ab	1.53±0.17ab	1.88±0.04b	2.42±0.05c	6.51±0.26c
RT3	0—20	7.28±0.43bc	3.41±0.02b	14.04±0.01bcd	1.53±0.05b	1.13±0.14c	2.61±0.02de	6.53±0.24d
	20—40	7.30±0.16b	4.99±0.19b	16.72±0.01bc	1.65±0.09a	0.86±0.07c	2.04±0.05d	5.59±0.17d
RT2	0—20	7.17±0.15cd	2.54±0.09c	21.48±0.01a	1.58±0.02ab	0.83±0.03c	2.46±0.03e	6.19±0.18d
	20—40	7.24±0.16b	2.79±0.17c	21.22±0.01a	1.59±0.05a	0.9±0.36c	1.95±0.04d	5.39±0.34d
RT1	0—20	7.02±0.08d	21.11±0.23a	16.82±0.02b	1.71±0.13a	0.51±0.08c	2.11±0.04f	4.54±0.22e
	20—40	7.19±0.10b	19.90±0.12a	17.25±0.01bc	1.62±0.07a	0.4±0.04c	2.06±0.06d	3.95±0.12e

注:表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示不同复垦年限同一土层土壤间差异达到显著水平($P<0.05$)。

除 RT1 外,其余复垦项目区在复垦当年即种植高粱,但 RT1 因地表裸露、蒸发强烈,故而其 0—20 cm 土层含盐量高于 20—40 cm;另外,2018 年研究区域受台风影响形成涝灾,致使 RT1 复垦项目区周边大量盐坨被水冲散,盐融化后再次进入土壤,加之 RT1 复垦后未进行大水漫灌,这一切导致 RT1 项目区土壤盐分含量显著高于其他项目区。废弃盐田复垦完成后一般大水漫灌 2 次,而 RT2 复垦项目区大

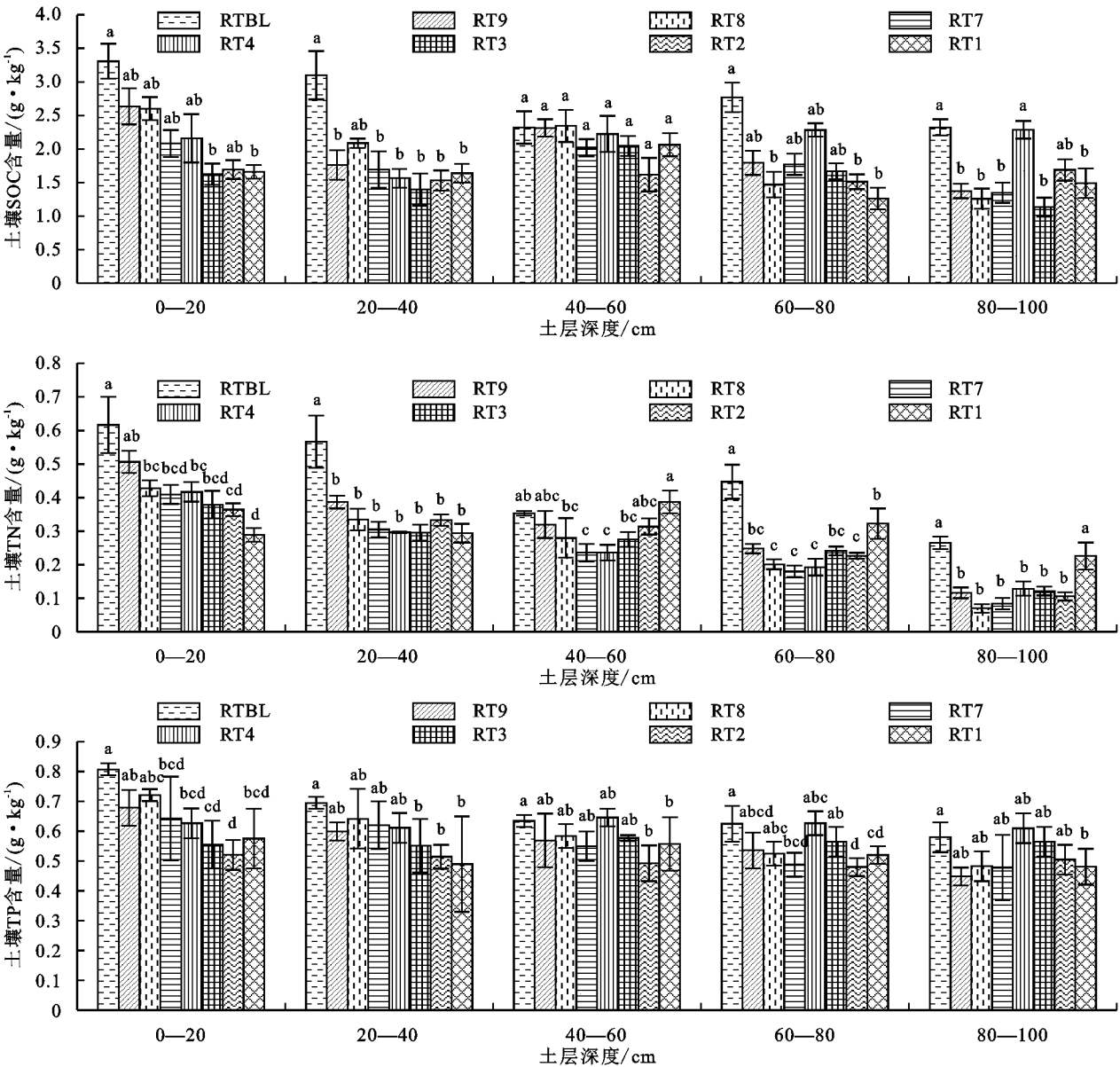
水漫灌 3 次,盐随水走,致使出现了 RT2 盐分含量低于 RT3 的现象。随土层深度的增加,复垦土壤 pH、含盐量整体呈现递增趋势。脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性随土层深度的增加而递减,而含水率、容重在垂直分布上规律不明显。

2.2 不同复垦年限土壤 SOC、TN 和 TP 含量特征 土壤 C、N、P 含量在不同复垦年限下均有不同程度的差异(图 2),农田及复垦 1,2,3,4,7,8,9 年

0—100 cm 土层土壤 SOC 含量的变化范围分别为 2.32~3.31,1.37~2.64,1.26~2.60,1.35~2.08,1.56~2.29,1.13~2.04,1.51~1.69,1.16~2.06 g/kg, 均值分别为 2.76,1.98,1.95,1.78,2.10,1.57,1.61,1.62 g/kg,随复垦年限的增加,0—20,20—40 cm 土层土壤 SOC 含量呈递增趋势;随土层深度的增加,各复垦年限在 20—40 cm 土层土壤 SOC 含量均低于 0—20 cm 土层。农田及复垦 1,2,3,4,7,8,9 年 0—100 cm 土层土壤 TN 含量的均值分别为 0.45,0.32,0.26,0.24,0.25,0.26,0.27,0.30 g/kg。农田及复垦 7,8,9 年 0—20,20—40,40—60 cm 土层土壤 TN 含量均表现为随复垦年限的增加而递增;垂直分布上,除复垦 1 年外,其余复垦年限土壤 TN 含量随土层深度增加而降低。农田及复垦 1,2,3,4,7,8,9 年 0—100 cm 土层土壤 TP 含量平均值分别为 0.67,0.57,0.59,

0.56,0.62,0.56,0.50,0.52 g/kg,各复垦年限土壤 TP 含量在 0—20,20—40 cm 土层随复垦年限的增加而增加;农田及复垦 7,8,9 年的 TP 含量随土层深度的增加而降低。

整体而言,不同复垦年限土壤 SOC、TN 和 TP 含量垂直空间分布特征在各处理中均表现为随复垦年限的增加而递增,但不同养分递增程度不同,复垦时间长(RT9、RT8、RT7)的土壤 SOC、TN 和 TP 随土层深度变化规律明显,短期复垦(RT3、RT2、RT1)的土壤 SOC、TN 和 TP 随土层深度变化无明显规律。土壤 SOC、TN 和 TP 含量在不同复垦年限中均表现为 0—20 cm 土层高于 20—40 cm 土层,2 个土层养分的变化规律大致相同。从土壤 SOC、TN 含量平均值来看,均随复垦年限的增加呈先下降后上升的趋势;土壤 TP 含量平均值随复垦年限的增加变化规律不明显。



注:不同小写字母表示不同复垦年限同一土层土壤间差异达到显著水平($P<0.05$)。下同。

图2 废弃盐田复垦土壤有机碳、全氮、全磷含量时空分布特征

2.3 不同复垦年限土壤生态化学计量学特征

由图 3 可知,农田及复垦 1,2,3,4,7,8,9 年 0—100 cm 土层土壤 C/N 的变化范围分别为 5.35~8.90, 4.60~12.47,6.15~19.62,5.09~16.73,5.05~18.73,4.29~9.30,4.62~16.13,3.63~5.95,各复垦年限土壤 C/N 随复垦年限的增加在 0—20,20—40 cm 土层表现为先降低后增加,在 40—60,60—80,80—100 cm 土层呈现相反的变化趋势;除复垦 1 年土壤外,其余复垦年限的土壤 C/N 均随土层深度的增加而增大。农田及复垦 1,2,3, 4,7,8,9 年 0—100 cm 土层土壤 C/P 的变化范围分别为 3.68~4.45,2.68~4.18,2.40~3.98,2.61~3.68,2.54~

4.40,2.16~3.54,4.62~16.13,2.21~3.77,变异系数平均值分别为 11.72%,15.62%,12.83%,13.37%,15.12%, 13.92%,16.47%,14.55%,RT2 的空间变异程度最大,RTBL 最小,土壤 C/P 随复垦年限的增加变化规律不明显,差异性不显著($P>0.05$)。农田及复垦 1, 2,3,4,7,8,9 年 0—100 cm 土层土壤 N/P 的变异系数平均值分别为 11.77%,10.83%,14.40%,13.72%, 8.86%,6.39%,5.29%,10.01%,各复垦年限土壤 N/P 随复垦年限的增加总体呈现出先减小后增大的趋势;除复垦 1 年土壤外,其余复垦年限的土壤 N/P 均随土层深度的增加而减小。

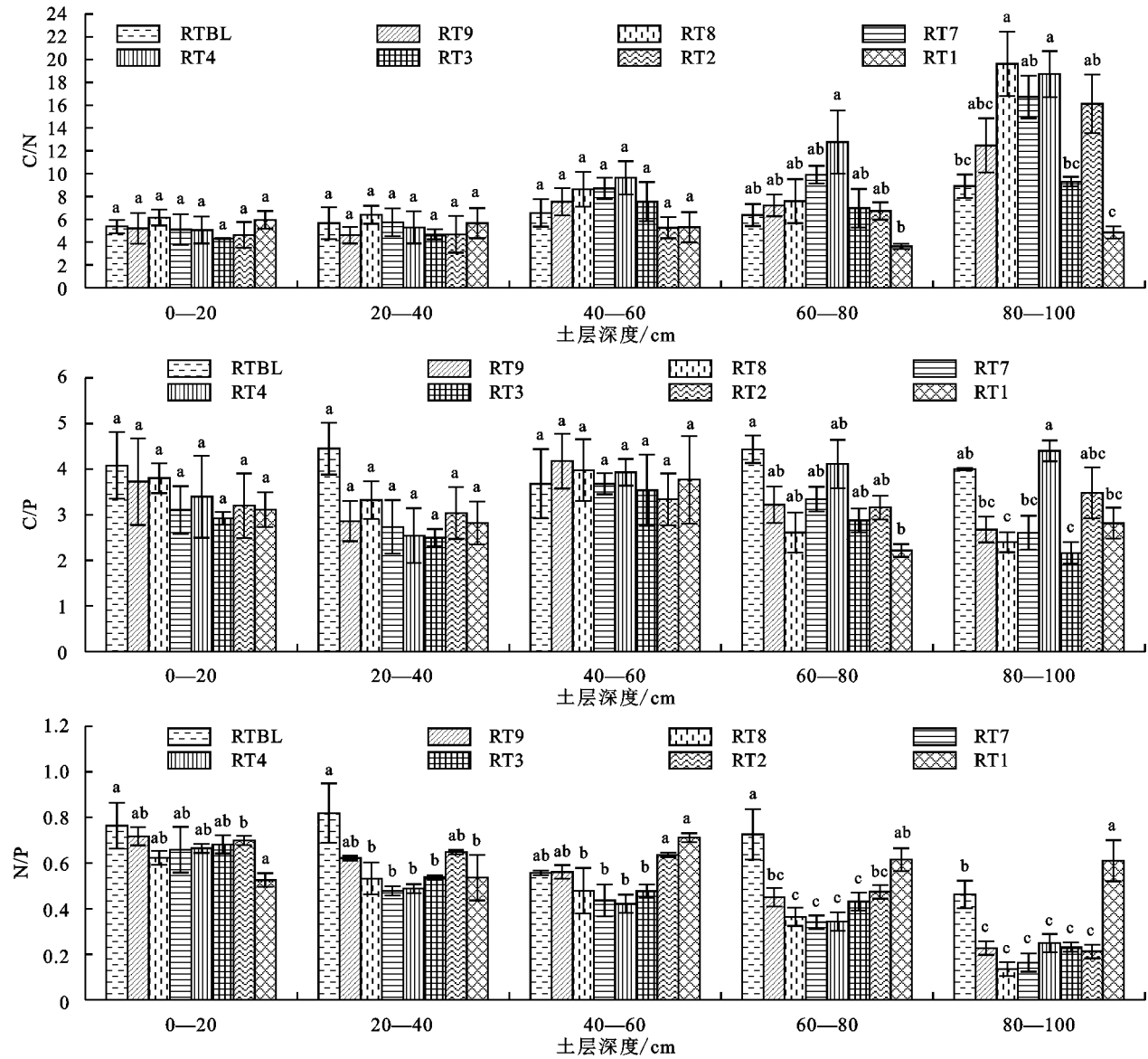


图 3 废弃盐田复垦土壤 C/N、C/P、N/P 时空分布特征

2.4 土壤特性对土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量比的影响

随着复垦年限的增加,土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量比也会随之变化。表 2 为土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量比与土壤特性的 Pearson 相关性分析。在 0—20 cm 土层,土壤 SOC、TP、N/P 均与土壤含盐量

和容重呈显著负相关关系($P<0.05$);土壤 SOC、TN、TP 均与土壤 pH 呈显著正相关关系($P<0.05$),与 C/P 呈极显著正相关关系($P<0.01$);土壤 TN 与 N/P 呈显著正相关关系($P<0.05$);土壤 SOC、TN 与土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶呈极显著正相关关系($P<0.01$),土壤 TP 与土壤脲酶、碱性磷酸酶呈极显著正相关关系($P<$

0.01),与蔗糖酶呈显著正相关关系($P<0.05$),土壤 C/P 与土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶呈显著正相关关系($P<0.05$)。在 20—40 cm 土层,土壤 SOC、TN 与容重呈极显著负相关关系($P<0.01$),与 C/P 呈极显著正相关关系($P<0.01$),与脲酶和碱性磷酸酶呈显著正

相关关系($P<0.05$);土壤 TP 与 pH、脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶呈极显著正相关关系($P<0.01$),与土壤含盐量、含水率、容重呈显著负相关关系($P<0.05$);土壤 C/P 与容重呈极显著负相关关系($P<0.01$),与 N/P 呈极显著正相关关系($P<0.01$)。

表 2 土壤 C、N、P 含量与土壤特性的相关性分析

土层 深度/cm	指标	理化特征				酶活性			生态化学计量学特征		
		pH	含盐量	含水率	容重	脲酶	碱性磷酸酶	蔗糖酶	C/N	C/P	N/P
0—20	SOC	0.767 *	−0.810 *	−0.677	−0.780 *	0.894 **	0.925 **	0.844 **	0.695	0.955 **	0.555
	TN	0.780 *	−0.632	−0.588	−0.794 *	0.881 **	0.924 **	0.865 **	0.405	0.838 **	0.802 *
	TP	0.734 *	−0.800 *	−0.758 *	−0.813 *	0.889 **	0.891 **	0.820 *	0.751	0.898 **	0.397
	C/N	0.085	0.372	−0.392	0.253	0.187	0.177	0.081	1	0.483	−0.533
	C/P	0.652	−0.403	−0.589	−0.579	0.766 *	0.829 *	0.719 *	0.483	1	0.464
	N/P	0.577	−0.807 *	−0.183	−0.826 *	0.599	0.673	0.680	−0.533	0.464	1
20—40	SOC	0.555	−0.580	−0.764 *	−0.907 **	0.742 *	0.724 *	0.615	0.453	0.967 **	0.777 *
	TN	0.528	−0.476	−0.656	−0.855 **	0.747 *	0.732 *	0.611	0.157	0.924 **	0.924 *
	TP	0.888 **	−0.710 *	−0.724 *	−0.795 *	0.920 **	0.853 **	0.909 **	0.447	0.614	0.355
	C/N	0.287	0.063	−0.475	−0.380	0.218	0.245	0.241	1	0.380	−0.139
	C/P	0.398	−0.254	−0.656	−0.859 **	0.633	0.582	0.501	0.380	1	0.860 **
	N/P	0.221	−0.223	−0.432	−0.690	0.514	0.461	0.347	0.355	0.860 **	1

注: * 和 ** 分别表示在 0.05(双侧)和 0.01(双侧)水平上显著相关。下同。

2.5 土壤 C、N、P 储量及其与生态化学计量比关系

不同复垦年限土壤表层 C、N、P 储量见表 3。在不同复垦年限中,表层土壤 C 储量的空间变异程度表现为 RT4>RT2>RT7>RT9>RTBL>RT3>RT1>RT8。RT4 的空间变异系数最大,为 57.52%,RT8 变异系数最小,仅为 12.34%。不同复垦年限土壤 N 储量空间变异系数均较 C 储量小,其中 RTBL 变异系数最大,为 20.75%,RT1 变异系数最小,为 7.31%。RTBL、RT9 N 储量平均值显著高于 RT1、RT2、RT3($P<0.05$)。RTBL、RT9 P 储量平均值显著高于 RT2、RT3($P<0.05$),空间变异程度 RT7 最

大,变异系数为 19.20%,RT8 最小,仅为 3.09%。由平均值可知,N、P 储量整体表现出随复垦年限的增加而增加;C 储量表现为在复垦初年(1~3 年)降低,随着复垦年限的增加,储量随之增加,但差异不显著($P>0.05$)。

土壤 C、N、P 储量与 C/N、C/P、N/P 的相关关系见表 4。土壤 C 储量与 N 储量、P 储量、C/N、C/P 呈极显著正相关关系($P<0.01$)。土壤 N 储量与 P 储量和 C/P 呈极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$)正相关关系。土壤 P 储量 C/N、C/P 呈显著正相关关系($P<0.05$)。综合来看,土壤 C 储量与 C/N、C/P、N/P 关系密切。

表 3 不同复垦年限表层土壤 C、N、P 储量特征

复垦 年限	C 储量/(t·km ^{−2})		C 储量 变异系数/%	N 储量/(t·km ^{−2})		N 储量 变异系数/%	P 储量/(t·km ^{−2})		P 储量 变异系数/%
	变化范围	平均值±标准差		变化范围	平均值±标准差		变化范围	平均值±标准差	
RTBL	711.10~1319.50	974.59±312.26a	32.04	149.72~222.54	180.87±37.53a	20.75	220.07~256.18	238.35±18.06a	7.58
RT9	423.65~1160.08	819.26±371.26a	45.32	136.32~184.67	156.92±24.96ab	13.36	204.58~232.77	217.97±14.15ab	6.49
RT8	686.95~880.86	789.34±97.41a	12.34	122.84~142.91	129.72±11.43bc	8.81	200.81~212.92	208.12±6.43abc	3.09
RT7	356.56~947.78	644.10±295.94a	45.94	116.83~136.21	127.68±9.90bc	7.75	158.20~233.54	200.35±38.46abc	19.20
RT4	448.07~1133.06	680.87±391.66a	57.52	112.67~153.01	129.48±20.99bc	16.21	176.30~218.48	194.11±21.84bcd	11.25
RT3	429.19~601.58	497.04±99.87a	20.09	99.80~142.81	116.08±21.33c	18.29	139.71~196.22	170.20±28.52cd	16.76
RT2	352.97~778.83	502.24±239.78a	47.74	96.31~113.99	107.59±9.79c	9.10	139.74~169.20	153.97±14.76d	9.59
RT1	483.92~658.20	569.50±87.18a	15.31	88.66~101.69	96.76±7.07c	7.31	173.03~201.85	184.75±15.15bcd	8.20

3 讨论

3.1 土壤碳、氮、磷含量时空变异格局

土壤 C、N、P 含量主要取决于物质输入与输出间的平衡^[14],其含量会受到植被类型、土地利用方式及环境因子等多种因素的影响^[1,22]。黄河三角洲废弃

盐田复垦土壤营养元素主要通过微生物作用、动植物残体的分解与转化积累、降雨以及农艺管理(灌溉、施肥、秸秆还田)等输入和输出过程的平衡来调节的。本研究结果显示,不同年限废弃盐田复垦土壤 0—100 cm 土层 SOC、TN 含量远低于全国平均值

(SOC:10 g/kg,TN:0.65 g/kg^[21]),TP 含量除复垦初期 RT1、RT2 低于全国平均水平 0.56 g/kg^[21]外,其余年限均持平或略高于全国平均含量,研究表明复垦土壤肥力的提升主要受 C、N 含量的制约。

表 4 土壤碳氮磷储量及生态化学计量学比的相关性系数矩阵

指标	C 储量	N 储量	P 储量	C/N	C/P	N/P
C 储量	1	0.679**	0.745**	0.775**	0.941**	0.330
N 储量		1	0.698**	0.078	0.505*	0.144
P 储量			1	0.449*	0.488*	0.280
C/N				1	0.836**	-0.060
C/P					1	-0.063
N/P						1

综合来看,垂直分布上,长期复垦的废弃盐田土壤 SOC、TN 含量均随土层深度的增加而降低,而 TP 含量随土层深度的增加虽有所降低,但总体差别不大,这与前人^[11-12]研究结论一致;短期复垦土壤(RT1、RT2、RT3)因经过一系列土地平整工程,如表土剥离、底土平整和回填、机械进行大范围整平等工序,破坏了原先的土体构型,致使复垦初期土壤 SOC、TN、TP 含量在土层垂直变化上的规律不明显。造成土壤养分“上多下少”原因主要有 2 点:(1)表层土壤易受植被枯落物的影响,较多的有机残体积聚于地表,加之表层土壤酶活性较高(表 1),受温湿度的影响使其对有机残体的分解速率高于中下部土壤;(2)植物根系对土壤养分的提升也会起到一定作用,根系的生物量随着土层深度的增加逐渐降低,其凋落物和分泌物可作为土壤 C 的重要来源,为微生物分解提供大量原料,根系生长还可改善土壤结构、降低土壤容重(表 1)、增加土壤孔隙,利于通气性及好氧型生物活性的增加^[23],进一步加速有机残体的分解、矿化及转运。复垦年限上,随着复垦年限的增加,作物种植年限、农艺管理次数(灌溉、施肥、秸秆还田、深耕)等因素均会导致复垦土壤养分格局随之变化。本研究结果表明,随复垦年限的增加土壤 SOC、TN 含量先下降后增加,而 TP 含量增减规律不明显。这与之前的研究结果既有相同点也有不同点,有研究^[24-25]表明,马尾松和杉木人工林的种植年限与土壤 C、N 含量呈正比;也有研究^[11,13]发现,马尾松随种植年限的增加土壤肥力先下降后升高。本研究结果与后者基本相同。复垦初期,由于土壤容重大、盐分含量高、酶活性低等不良因素,对作物生长和微生物活动均营造了一种不利的土壤环境,地力消耗偏少,土壤中尚可保留一定的养分含量。随着复垦年限(即作物种植年限)的增加,持续的粗放式管理、靠天吃饭

的观念致使作物长势越来越差,常出现斑块式的作物群,作物密度降低,产量低下,即使土壤环境有所改善,但因作物生长发育消耗及养分流失的速度已超过秸秆还田补偿养分的速度,致使土壤肥力下降。已有研究^[26]指出,作物吸收的大部分氮素(约占 64%)来源于非肥料氮,即通过土壤自身的矿化和硝化供氮,因此,不重视土壤原有氮的消耗与补偿,极易造成土壤中氮失衡。随着后续的追肥、灌溉、深耕除草等人类活动以及秸秆粉碎化深还田技术的推广应用,土壤结构极度改善,作物生产力逐渐趋于稳定,生物量及凋落物数量增加,使得土壤肥力逐步回升。土壤 SOC、TN、TP 含量与土壤容重均呈显著负相关,与前人^[4]的研究结果一致。复垦后土壤碳氮含量增加一方面与作物种植可增加有机物的输入、提高土壤酶活性等因素有关;另一方面,土壤含盐量降低也为土壤碳氮积累营造了良好的环境条件。因此,滨海废弃盐田复垦后发展农作物种植有利于土壤质量的改善与土壤碳汇功能的提升。

3.2 土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征

土壤内部 C、N、P 的循环(固定和矿化)可以通过土壤生态化学计量比来反映^[5,27],各计量比能很好地指示土壤营养元素的限制及其有效性。综合来看,复垦土壤 C/N>C/P>N/P。

土壤 C/N 作为衡量土壤养分平衡状况的重要指标,即土壤有机质矿化速率快慢和释放养分能力强弱的标志。本研究中,RTBL~RT1 0—100 cm 土层土壤 C/N 的平均值分别为 6.56,7.40,9.68,9.23,10.23,6.55,7.48,5.07。结果表明,不同复垦年限土壤 C/N 的平均值均低于全国农田土壤平均值,说明土壤微生物量及酶活性的提高加速了有机碳的矿化,降低土壤有机碳的含量。比值较低主要有 3 方面原因:(1)复垦土壤 SOC 含量均低于全国平均水平^[21],土壤 SOC 含量较低加强了分母 TN 含量的限制作用;(2)不同复垦年限土壤随土层深度的增加 SOC 含量变化程度大于 TN 含量的变化程度(图 2);(3)机械化作业致使耕层土壤结构遭到破坏,使土壤有机碳、氮、磷易随降雨或灌溉渗漏、流失。造成土壤 C/N 先增加后下降的原因可能是复垦初期土壤结构较差,微生物活性相对较低,使得土壤矿化有机质能力较弱,导致 C/N 升高。垂直分布上,土壤 C/N 随土层深度的增加总体趋于升高,这与中下部土壤酶活性下降、微生物减少、有机物分解速度降低等因素有关,与闫玉琴等^[2]、郭其强等^[11]的研究结果相似。另外,土壤 C/N 的变异系数较小(15.60%~20.77%),表明复垦土壤 SOC

的形成所需 N 的数量较稳定,有利于复垦土壤 N 储量和生态系统 C 储量的估算。

土壤 C/P 是磷有效性的表征参数,低 C/P 说明土壤 P 有效性较高。本研究中,RTBL~RT1 0—100 cm 土层土壤 C/P 的平均值分别为 4.13,3.33,3.22,3.09,3.68,2.80,3.24,2.95。不同年限复垦土壤 C/P 的平均值均远低于中国土壤平均水平(60.00)^[4],可见复垦土壤 P 有效性较高。随复垦年限和土层深度增加土壤 C/P 无明显规律。土壤 N/P 可在一定程度上反映土壤养分的供应能力,是当前限制性养分判断的重要指标之一^[28]。研究区 RTBL~RT1 0—100 cm 土层土壤 N/P 的平均值分别为 0.67,0.52,0.43,0.42,0.43,0.47,0.53,0.60。土壤 N/P 随复垦年限增加先下降后上升,均远低于中国土壤(5.10)的研究结果^[4]。土壤 N/P 为 RTBL 最高,其次为 RT1,而 RT7 最低。本研究中,RT1 在复垦后未种植作物,土壤中的养分相对消耗较少,随着作物种植年限的增加,作物对土壤养分的需求也相应增加,但粗放式管理使得土壤养分输出大于输入,致使土壤 N/P 不断降低;到 RT8、RT9 阶段,土壤 N 含量持续增加,使得 N/P 逐渐回升。因此,复垦区种植模式、耕作措施也会对土壤碳氮磷生态化学计量时空分布特征产生影响。相关分析也表明,土壤 SOC、TN 与 C/P、N/P 均呈显著或极显著相关,说明二者均是调控废弃盐田复垦土壤生态化学计量比的主要因素。

由表 3 可知,土壤 C、N、P 储量随复垦年限的增加而增加,与邢文黎等^[15]、雷军等^[29]的研究结果一致。空间变异程度为 C 储量>N 储量>P 储量。C 储量的变化范围为 497.04~974.59 t/km²,增量最多,说明土壤有机碳储量的稳定性较差,更易受到人为活动和自然因素的影响。从总体上看,废弃盐田复垦土壤 C、N、P 储量与 C/N、C/P 呈极显著或显著正相关关系(表 4),特别是土壤 C 储量与 C/N、C/P,这表明土壤生态化学计量学特征对土壤碳、氮、磷储量具有一定的指示作用。

4 结论

(1)黄河三角洲废弃盐田复垦土壤随复垦年限增加,土壤 SOC、TN 含量及 N/P 先降低后升高,即复垦初期(RT1、RT2、RT3)土壤 SOC、TN 含量逐年降低,长期复垦(RT7、RT8、RT9)土壤 SOC、TN 含量逐渐增加;而 TP 含量则表现为波动变化。另外,C/N 呈先升高后降低的趋势,土壤表层 C、N、P 储量不断增加。

(2)黄河三角洲废弃盐田复垦土壤随土层深度增加,土壤 TP 含量及除 RT1 外的土壤 TN 含量先升

高后降低,C/N 与 N/P 呈相反的变化趋势,土壤 SOC 含量、C/P 在不同复垦年限 0—40 cm 土层中呈现降低趋势。

(3)相关性分析表明,土壤 SOC、TN、TP 与土壤容重及脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶呈显著或极显著相关关系,表层土壤 C 储量与 C/N、N/P 呈极显著相关关系,土壤 SOC、TN 含量为调控复垦土壤生态化学计量比的主要因素。

参考文献:

[1] 程欢,宫渊波,吴强,等.川西亚高山/高山典型土壤类型有机碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征[J].自然资源学报,2018,33(1):161-172.

[2] 闫玉琴,解刚,项宇,等.毛乌素沙地湖滨带沉积物碳氮磷生态化学计量学特征[J].水土保持学报,2018,32(2):223-228.

[3] 宁志英,李玉霖,杨红玲,等.沙化草地土壤碳氮磷化学计量特征及其对植被生产力和多样性的影响[J].生态学报,2019,39(10):3537-3546.

[4] 卓志清,李勇,兴安,等.东北旱作区土壤碳氮磷生态化学计量特征及其影响因素[J].农业机械学报,2019,50(10):259-268,336.

[5] 孙美美,关晋宏,岳军伟,等.黄土高原西部针叶林植物器官与土壤碳氮磷化学计量特征[J].水土保持学报,2017,31(3):202-208.

[6] Cao Y, Zhang P, Chen Y M. Soil C : N : P stoichiometry in plantations of N-fixing black locust and indigenous pine, and secondary oak forests in Northwest China[J].Journal of Soils and Sediments,2018,18(4):1478-1489.

[7] 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司.潍坊废弃盐田、滩涂上的 3GW“光伏+”基地规划[EB/OL].(2015-05-20) [2017-05-09]. <http://www.ne21.com/news/show-76524.html>.

[8] 李光宇.山东沿海某地废弃盐田修复技术研究[D].青岛:中国海洋大学,2014.

[9] 刘文全,卢芳,徐兴永,等.废弃盐田复垦利用后土壤盐分与有机质含量空间变异特征[J].生态学报,2018,38(4):1311-1319.

[10] 刘文全,卢芳,徐兴永,等.滨海废弃盐田复垦区土壤盐分和有机质的空间变异特征[J].农业工程学报,2019,35(19):183-190.

[11] 郭其强,盘金文,李慧娥,等.贵州高原山地马尾松人工林土壤碳、氮、磷生态化学计量特性[J].水土保持学报,2019,33(4):293-298.

[12] 李明军,喻理飞,杜明凤,等.不同林龄杉木人工林植物凋落叶—土壤 C、N、P 化学计量特征及互作关系[J].生态学报,2018,38(21):7772-7781.

[13] 雷丽群,卢立华,农友,等.不同林龄马尾松人工林土壤

- 碳氮磷生态化学计量特征[J].林业科学研究,2017,30(6):954-960.
- [14] 胡敏杰,任洪昌,邹芳芳,等.闽江河口淡水、半咸水沼泽土壤碳氮磷分布及计量学特征[J].中国环境科学,2016,36(3):917-926.
- [15] 邢文黎,王臣,熊静,等.浦东东滩湿地围垦对土壤碳氮储量及酶活性影响[J].生态环境学报,2018,27(4):651-657.
- [16] 李海云,姚拓,张建贵,等.东祁连山不同干扰生境草地土壤养分时空变化特征[J].水土保持学报,2018,32(3):249-257.
- [17] 李丹维,王紫泉,田海霞,等.太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J].土壤学报,2017,54(1):160-170.
- [18] 陈印平,夏江宝,赵西梅,等.黄河三角洲典型人工林土壤碳氮磷化学计量特征[J].土壤通报,2017,48(2):392-398.
- [19] 张友,徐刚,高丽,等.黄河三角洲新生湿地土壤碳氮磷分布及其生态化学计量学意义[J].地球与环境,2016,44(6):647-653.
- [20] 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[J].水土保持学报,2013,27(2):204-208.
- [21] 刘兴华,公彦庆,陈为峰,等.黄河三角洲自然保护区植被与土壤 C、N、P 化学计量特征[J].中国生态农业学报,2018,26(11):124-133.
- [22] Jiang Y F, Guo X. Stoichiometric patterns of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in farmland of the Poyang Lake region in southern China[J].Journal of Soils and Sediments,2019,19(10):3476-3488.
- [23] Zhang X F, Xin X L, Zhu A N, et al. Linking macro-aggregation to soil microbial community and organic carbon accumulation under different tillage and residue managements[J].Soil and Tillage Research,2018,178:99-107.
- [24] 崔宁洁,刘小兵,张丹桔,等.不同林龄马尾松人工林碳氮磷分配格局及化学计量特征[J].生态环境学报,2014,23(2):188-195.
- [25] 吴明,邵学新,周纯亮,等.中亚热带典型人工林土壤质量演变及其环境意义[J].生态学杂志,2009,28(9):1813-1817.
- [26] Quan Z, Li S L, Zhang X, et al. Fertilizer nitrogen use efficiency and fates in maize cropping systems across China: Field ^{15}N tracer studies[J].Soil and Tillage Research,2020,197:104498.
- [27] Ai Z M, Xue S, Wang G L, et al. Responses of non-structural carbohydrates and C : N : P stoichiometry of, *bothriochloa ischaemum*, to nitrogen addition on the Loess Plateau, China[J].Journal of Plant Growth Regulation,2017,36(3):714-722.
- [28] Zhang P, Wei T, Li Y L, et al. Effects of straw incorporation on the stratification of the soil organic C, total N and C : N ratio in a semiarid region of China[J].Soil and Tillage Research,2015,153:28-35.
- [29] 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.
- (上接第 351 页)
- [26] Li J, Bao H Y, Xing W J, et al. Succession of fungal dynamics and their influence on physicochemical parameters during pig manure composting employing with pine leaf biochar [J]. Bioresource Technology, 2020,297:122377.
- [27] Lucheta A R, Cannavan S de F, Roesch L F W, et al. Fungal community assembly in the Amazonian Dark Earth[J].Microbial Ecology,2016,71(4):962-973.
- [28] Li Y, Yang Y Q, Shen F, et al. Partitioning biochar properties to elucidate their contributions to bacterial and fungal community composition of purple soil[J].Science of The Total Environment,2019,648:1333-1341.
- [29] Quilliam R S, Glanville H C, Wade S C, et al. Life in the ‘charosphere’-Does biochar in agricultural soil provide a significant habitat for microorganisms? [J].Soil Biology and Biochemistry,2013,65:287-293.
- [30] Wang J Y, Xiong Z Q, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects[J].GCB Bioenergy,2016,8(3):512-523.
- [31] Muhammad N, Dai Z M, Xiao K C, et al. Changes in microbial community structure due to biochar generated from different feed stocks and their relationships with soil chemical properties[J].Geoderma,2014,226:270-278.
- [32] Masiello C A, Chen Y, Gao X D, et al. Biochar and microbial signaling: Production conditions determine effects on microbial communication[J].Environmental Science and Technology,2013,47(20):11496-11503.