

北方典型水稻土有机质及其组分演变特征

王莹莹, 张 昀*, 张广才, 高晓丹, 叶 超, 刘思齐, 张雅楠, 李 丽

(沈阳农业大学土地与环境学院/土肥资源高效利用国家工程实验室/
农业部东北耕地保育重点实验室, 辽宁沈阳 110866)

摘要:【目的】探究我国北方淹育型水稻土在开垦耕种过程中土壤有机质及其组分的演变特征, 为提高水稻土有机质的品质、合理利用水稻土及提高其生产潜力、建设高产稳产稻田提供理论依据和数据支撑。

【方法】本研究以辽宁省各地棕壤和草甸土上发育的不同开垦年限淹育型水稻土为研究对象, 通过野外调查、田间定点试验及室内测试分析等手段, 研究了开垦年限对水稻土有机质含量与组成及其腐殖质特性的影响。

【结果】水稻土耕层有机质总量 (SOM) 随开垦年限的增加维持在 18.60~26.30 g/kg 之间, 与开垦年限无显著相关关系 ($P > 0.05$), 但易氧化有机质含量占有机质总量的比例 (ROM/SOM) 均在 50% 以上, 并且随水稻土开垦年限增加而下降, 降幅为 18%~20%; 有机质氧化稳定系数 (Kos) 均在 1.2 以下, 随着水稻土开垦年限增加呈上升趋势, 增幅为 52%~57%, 胡富比 (HA/FA) 及胡敏酸相对色度 (RF) 随开垦年限增加而增大, 但胡敏酸活化度 (AD) 和土壤腐殖质的松/紧 (LCH/TCH) 明显下降。【结论】北方水稻土随着开垦年限的增加, 土壤中的有机质稳定性增加, 活性降低, 耕层土壤对养分的供、贮能力减弱, 土壤肥力水平下降, 限制了北方水稻土生产潜力的发挥, 应通过耕作管理和有机无机肥料配施来防止或减缓水稻土肥力的下降。

关键词: 开垦年限; 水稻土; 土壤有机质; 腐殖质组成; 胡敏酸

Evolutionary characteristics of organic matter and its components in typical paddy soils in northern China

WANG Ying-ying, ZHANG Yun*, ZHANG Guang-cai, GAO Xiao-dan, YE Chao, LIU Si-qi, ZHANG Ya-nan, LI Li
(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources/Key Laboratory of Arable Land Conservation and Improvement in Northeast China, Ministry of Agriculture, Shenyang 110866, China)

Abstract: 【Objectives】The objective of this research is to explore the evolutionary characteristics of soil organic matter (SOM) and its components during the cultivation history of paddy soil in northern China, and to provide theoretical basis and data support for the improvement of SOM quality, rational utilization of paddy soil and improving its production potential, and establishment of high and stable-yielding paddy fields. 【Methods】The submerged paddy soils developed from brown soils and meadow soils in different planting years in Liaoning Province were chosen as the research objects. Combining investigation, field fixed-site test and indoor analysis, the effects of rice cultivation history on the content and fractions of SOM and humus characteristics of paddy soil were elucidated. 【Results】There was no significant correlation between the total SOM content and the age of rice cultivation ($P > 0.05$), and the total SOM content was maintained at 18.60–26.3 g/kg. With the increment of rice cultivation years, the proportion of easily oxidized organic matter (ROM) in SOM was reduced by 18%–20%, even though its content was above 50% at the beginning, and the organic matter oxidation stability coefficient (Kos) was below 1.2, with an increase of 52%–57%. The ratio of humic acid to fulvic acid (HA/FA)

收稿日期: 2018–12–03 接受日期: 2019–04–10

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503118-10); 国家自然科学基金项目(41601230); 博士后科学基金项目(2017M611265)。

联系方式: 王莹莹 E-mail: 2391925245@qq.com; * 通信作者 张昀 E-mail: zhangyun1977@syau.edu.cn

and the relative color (RF) of HA were increased, the activation degree of humic acids (AD) and the looseness/tightness of soil humus decreased significantly, with the increment of the rice cultivation years, respectively. 【Conclusions】 With the extension of the planting years of rice, the soil organic matter become stable in property and less active, which leads to weakened ability of paddy soil in supplying and storing nutrients, and is unfavorable for exerting the production potential of the paddy fields. Appropriate tillage and nutrient managements should be considered to slow down and prevent the decline of soil fertility eventually.

Key words: cultivation history; paddy soil; soil organic matter; humus composition; humic acid

土壤有机质 (SOM) 是土壤肥力的重要物质基础, 其含量多少和品质好坏是评价土壤肥力的重要指标^[1]。在对江西红壤丘陵水田^[2]、湖南丘陵和洞庭湖湿地地区^[3]、太湖地区县域^[4]土壤有机碳的研究表明, 水稻土的固碳效应显著, 且速率和调控幅度远大于旱田^[5-7]。当然, 不同的施肥量^[8-9]、土壤类型^[10]、耕作制度^[11]和管理措施^[12]都在不同程度上影响和调节水稻土的固碳强度。我国是世界水稻生产大国^[13], 开垦水稻土历史悠久且幅员辽阔, 国内外对其研究较早也较多。研究发现, 近 30 年来, 南方稻田土壤耕作层的有机碳含量随耕作年限逐年增加^[14-15], 种稻年限在 50~2000 年内, 耕作表层有机碳含量受耕作年限影响较小, 30—60 cm 土层有机碳含量显著增加^[16]。张雯辉等^[17]对吉林盐碱土稻田区土壤有机碳含量的研究表明, 在 0~37 年内, 稻田土壤有机碳含量随耕作年限的增加而增加, 有机碳的纵向分布自上而下逐层减少, 在稻田开发 57 年后逐渐趋于稳定。而章明奎等^[18]认为从 1980 年开始的 28 年间, 水稻土 SOM 含量总体降低, 平均降幅为 5.58%。由此可见, 不同研究者对不同区域的研究结果存在一定的差异。这可能是由于南北方水稻土性质差异造成的, 一方面南北方水稻土的起源土壤不同, 北方水稻土保留着起源土壤的特性^[19]。此外, 北方水稻土成土过程也不同于南方水稻土^[20-21], 北方水稻土腐殖质以胡敏酸为主, 而南方土壤中的腐殖质则以富里酸为主^[22]。古小洽等^[23]认为, 随着种稻时间变长, 结合态的腐殖质和胡敏酸 (HA) 在土壤中积累, 在开垦 1000 年的水稻土中腐殖质的芳化程度最高、结构最复杂。可见, 腐殖质的特性影响水稻土 SOM 生产潜力的发挥^[24]。但我国对于北方稻田不同开垦年限土壤各腐殖质组分变化少有研究。

辽宁省水稻生产的发展从 1949 年开始, 已有 69 年的历史^[25]。在同一区域内, 由于气候、母质、地形、生物等自然因素基本相同, 时间和人为因素是影响水稻土发育特征的主要因素, 其人为因素主要是土壤耕作^[26], 在耕作强度和种稻熟制变化不大的情况下, 耕作年限成为引起水稻土发育特征差异的

主导因素。棕壤型和草甸土型水稻土是辽宁省面积大且高产的两种不同类型的水稻土, 基础肥力指数均大于 60%^[27]。但辽宁省的稻田大多由旱田转变而来, 由于不完善的水利设施, 其中一部分的稻田与旱田不断转变^[28], 在这种不规律的转变过程中, 耕作年限对北方水稻土 SOM 各组分含量及腐殖酸结构特征的影响有待进一步研究。因此, 本文在前人研究的基础上选取辽宁省各地不同开垦年限棕壤型和草甸土型水稻土, 采用腐殖质组成修改法^[29]与傅积平^[30]连续测定相结合的方法, 探究北方稻田 SOM 及其组成的演变特征, 旨在阐明长期人为耕作及常规施肥管理对稻田土壤 SOM 分解和转化特征的影响, 以提高北方水稻土 SOM 品质及其化学稳定机制, 深入认识水耕条件下北方稻田土壤肥力的演变规律。

1 材料与方 法

1.1 野外调查与采集土样

根据辽宁省现有水稻土的地域分布和水稻土肥力观测点试验结果, 以全国第二次土壤普查所确定的亚类—淹育型水稻土为基本单元进行广泛调查, 分别调查其面积、开垦历史、管理方式及环境条件、剖面发育及分化程度, 并在相同母质、相同肥力水平 (相同肥力水平的确定以同一地点、同一管理水平条件下的产量差异为标准) 下, 采集不同开垦年限的水稻土样品。

田间试验是在野外调查的基础上设置的定点试验。每个试验点在开垦年限的前 3 年由旱田种植玉米改成种植水稻, 而后每年一季水稻, 其采用有机无机相结合的施肥模式, 即 N 175 kg/hm² (尿素)、P₂O₅ 90 kg/hm² (磷酸二铵)、K₂O 115 kg/hm² (硫酸钾)、有机肥 (猪廐肥) 用量为 31000 kg/hm²。棕壤型和草甸土型水稻土采自辽宁省各地区不同开垦年限 (分别为 8、10、18、26、28、36、43、60 年) 的水稻土 (表 1)。供试土壤外部环境共同特点是: 地形平坦, 处于冲积平原或比较开阔的低级阶地, 田块质地和耕层厚度均相同, 排灌自由, 大多数为井水灌

溉，四季分明，日照充足，年平均降水量为 400~800 mm，无霜期 130~180 天，平均无霜期在 150 天左右，有利于水稻生长，属于温带大陆性季风气候。

土样采集时间为 2015 年 4 月整地之前，样地之间距离至少大于 3 km (样地的采样点数见表 1)，每个采样点 5 个重复，相距 10 m，并且根据田块形状及面积大小，选择蛇形法于田间采样，使用不锈钢土钻采集 0—20 cm 耕层混合土壤，采取四分法将多余土去除，保留 2 kg 作为待测样品，风干、过筛，用于土壤理化指标的测定。供试土壤的基本理化性状见表 2。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 土壤有机质相关指标的测定 土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法—外加热法^[31]。易氧化有机质含量及有机质的氧化稳定系数 (Kos) 采用袁可能等^[32]

的方法。

1.2.2 土壤腐殖质相关指标的测定 1) 土壤中腐殖酸的提取分别采用 0.1 mol/L NaOH + 0.1 mol/L Na₂P₂O₇、0.25 mol/L NaOH 和 0.25 mol/L NaF 作为提取剂，提取的腐殖酸占腐殖质总量的百分数称为腐殖酸提取率。HA/FA 为胡敏酸 (HA) 与富里酸 (FA) 含量的比值，土壤 HA、FA 采用腐殖质组成修改法^[31]提取。

2) 胡敏酸特性的测定采用将提取的 HA 在 2 小时内于 215、265、325、465、600 及 665 nm 条件下进行光密度的测定^[28]。

胡敏酸活化度 = HA 中 KMnO₄ 氧化的碳量 / HA 中丘林法测定的碳量 × 100%

胡敏酸相对色度 = E₆/V × 100

E₆ 值为采用 0.136 mg/L 的 HA 和 FA 的 0.1

表 1 淹育型水稻土样品采集地点

Table 1 Location of flooded paddy soil samples

采样地点 Sampling location	采样点数 Sample No.	起源土壤 Original soil type	开垦年限 (a) Cultivation history	水稻产量 (kg/hm ²) Rice yield
铁岭县腰堡镇 Yaobao Town, Tieling County	6	棕壤 Brown soil	8	9843 ± 11
新民市胡台乡 Hutai Village, Xinmin City	5	草甸土 Meadow soil	8	9936 ± 11
苏家屯区大淑乡 Dashu Village, Sujiatun District	5	棕壤 Brown soil	10	9095 ± 10
新民县胡台乡 Hutai Village, Xinmin County	6	草甸土 Meadow soil	10	9004 ± 12
康平县四家子村 Sijiazhi Village, Kangping County	7	棕壤 Brown soil	18	9542 ± 10
辽阳县二台子村 Ertaizi Village, Liaoyang County	5	草甸土 Meadow soil	18	9542 ± 13
海城市大王村 Dawang Village, Haicheng City	6	棕壤 Brown soil	26	9546 ± 10
辽阳县黄泥洼镇 Huangniwa Town, Liaoyang County	5	草甸土 Meadow soil	26	9534 ± 11
海城市西四镇 Xisi Town, Haicheng City	8	棕壤 Brown soil	28	9635 ± 12
辽中县刘二堡镇 Liuerbao Town, Liaozhong County	5	草甸土 Meadow soil	28	9835 ± 11
海城市西柳镇 Xiliu Town, Haicheng City	7	棕壤 Brown soil	36	9844 ± 12
新民县大王庄村 Dawangzhuang Village, Xinmin County	5	草甸土 Meadow soil	36	9940 ± 12
于洪区马三家村 Masanjia Village, Yuhong District	5	棕壤 Brown soil	43	9839 ± 12
海城市耿庄村 Gengzhuang Village, Haicheng City	6	草甸土 Meadow soil	43	9238 ± 10
苏家屯区大淑乡 Dashu Village, Sujiatun District	5	棕壤 Brown soil	60	9431 ± 11
沈阳市于洪区 Yuhong District, Shenyang	6	草甸土 Meadow soil	60	9250 ± 10

表 2 淹育型高产水稻土的基本理化性状

Table 2 Basic physical and chemical properties of flooded high-yield paddy soils

起源土壤 Original soil	土壤质地 Soil texture	pH	黏粒 (%) Clay	粉粒 (%) Silt
棕壤型 Brown soil	中壤土 Medium loam	6.13 ± 0.03	32.11 ± 0.25	30.54 ± 0.24
草甸土型 Meadow soil	中壤土 Medium loam	6.09 ± 0.05	31.98 ± 0.38	32.47 ± 0.36

mol/L NaOH 溶液分别于波长 600 nm 处测定其吸光值; V 为用来测定 E_6 的 30 mL 的 HA 溶液所消耗的高锰酸钾的毫升数。

3) 有机无机复合度和腐殖质结合形态的测定用傅积平^[30]连续测定方法。

1.3 数据处理

数据处理和统计分析采用 Microsoft Office Excel 2013 和 IBM SPSS Statistics 20 软件。绘图采用 Origin8.5 软件。差异显著性分析用 Duncan 法, 相关性分析采用 Pearson 双侧显著性检验。

2 结果与分析

2.1 水稻土有机质含量与组成随开垦年限增加的演变特征

随着开垦年限的增加, 水稻土有机质总量 (SOM) 维持在 18.40~26.30 g/kg 之间 (图 1A), 草甸型水稻土 SOM 含量在开垦年限为 18 年时最高, 达 25.10 g/kg, 而棕壤型水稻土在 8 年时最高, 达 26.30 g/kg, 通过 SOM 含量和开垦年限进行相关分析 (表 3) 发现, SOM 含量的高低与开垦年限无相关关系, 但易氧化有机质含量 (ROM), 特别是易氧化有机质含量

占有有机质总量的比例 (ROM/SOM) 与开垦年限呈显著负相关 ($r = -0.981^{**}$, $P < 0.01$, 图 1C, 表 3), 棕壤型和草甸土型水稻土随开垦年限的增加, ROM/SOM 的降幅分别为 20% 和 18% (图 1C)。有机质氧化稳定系数 (Kos 值) 与开垦年限呈显著正相关关系 ($r = 0.977^{**}$, $P < 0.01$, 图 1D, 表 3), 棕壤型和草甸土型水稻土随开垦年限的增加, Kos 值的增幅分别为 57% 和 52% (图 1D)。综上, 随着开垦年限的增加, ROM 被大量消耗, 土壤养分供应能力降低, 而 Kos 值逐渐增加表明难氧化有机质性质稳定, 矿化较慢, 对养分的供应较慢, 水稻土的土壤质量有退化趋势, 表明水稻土开垦年限是影响有机质组分和土壤肥力的重要因素。

2.2 水稻土腐殖酸特性随开垦年限的演变特征

图 2 表明, 随开垦年限的增加, 棕壤型和草甸土型水稻土腐殖酸提取率 (HE/HT) 呈下降趋势。但 HE/HT 在不同开垦年限间, 下降幅度略有不同。棕壤型水稻土的 HE/HT 在开垦 10~26 年之间曲线斜率较大, 降幅为 0.18~0.22, 而开垦 26~43 年之间曲线斜率较平稳, 降幅为 0.03~0.09。两种类型水稻土的 HE/HT 均是在开垦 43 年以后, 曲线斜率开始增大, 下降幅度较明显。北方水稻土 HE/HT 随开垦

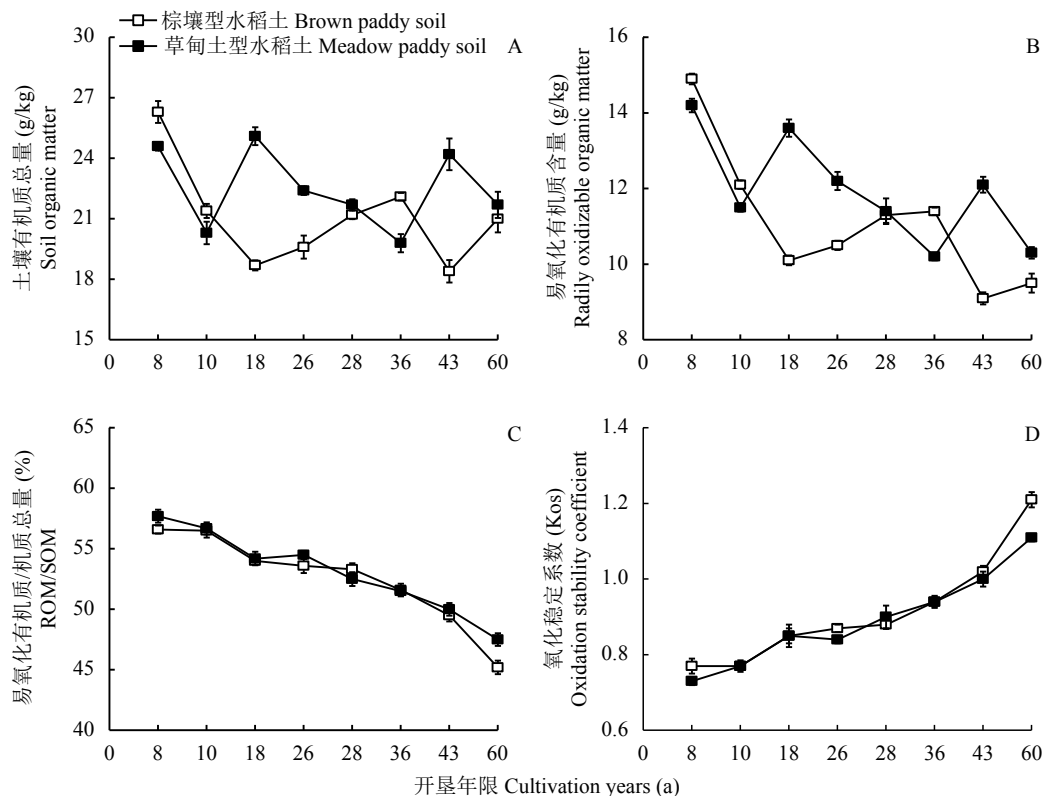


图 1 不同开垦年限水稻土中有机质含量及其特征

Fig. 1 Content and properties of organic matter in paddy soils under different cultivation years

表 3 不同开垦年限土壤有机质含量及组成的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of the soil organic matter content and composition in cultivation history

项目 Item	年限 History	SOM	ROM	ROM/SOM	Kos	HA/FA	RF	QC	LCH/TCH
年限 History	1								
SOM	-0.289	1							
ROM	-0.674**	0.897**	1						
ROM/SOM	-0.981**	0.307	0.694**	1					
Kos	0.977**	-0.286	-0.676**	-0.997**	1				
HA/FA	0.904**	-0.135	-0.510*	-0.866**	0.860**	1			
RF	0.911**	-0.157	-0.522*	-0.861**	0.853**	0.984**	1		
QC	0.943**	-0.321	-0.684**	-0.959**	0.953**	0.775**	0.793**	1	
LCH/TCH	-0.818**	0.435	0.718**	0.846**	-0.835**	-0.555*	-0.579*	-0.932**	1

注 (Note): SOM—有机质总量 Soil organic matter; ROM—易氧化有机质 Easily oxidized organic matter; Kos—有机质氧化稳定系数 Organic matter oxidation stability coefficient; HA—胡敏酸 Humic acid; FA—富里酸 Fulvic acid; RF—胡敏酸相对色度 Humic acid relative color; QC—有机无机复合度 Quantity of complex organic carbon; LCH—松结合态土壤腐殖质 Loosely combined humus; TCH—紧结合态土壤腐殖质 Tightly combined humus. *— $P < 0.05$ (双侧 Both sides); **— $P < 0.01$ (双侧 Both sides).

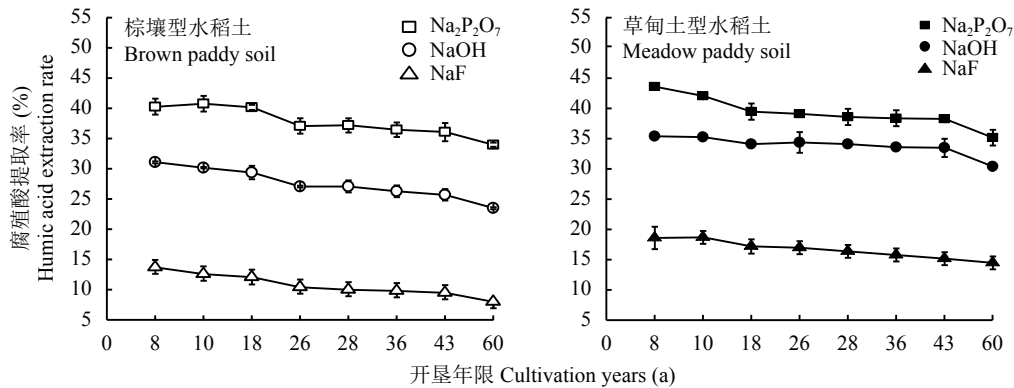


图 2 不同开垦年限水稻土的腐殖酸的提取率

Fig. 2 Humic acid extraction rate of paddy soils under different cultivation years

年限的增加而下降,表明水稻土中腐殖质含量减少,腐殖化程度加深,有机质不易积累,胡敏酸的活化度(AD)(图3B)的变化曲线也充分印证了这一点。

胡敏酸是土壤腐殖质的重要组成成分,其含量和特性在一定程度上能反映土壤腐殖质的类型和性质。HA/FA比值、胡敏酸的相对色度(RF)随水稻土开垦年限的加长而增大,而AD显著下降。长期耕作影响了土壤中HA和FA的转化,两种类型水稻土的HA/FA分别提高了56%和43%,其变化规律与AD呈显著负相关,AD分别降低了18%和17%(图3B,表3)。而RF分别显著提高了18%和17%(图3C),结果表明水稻土在开垦过程中,尤其是开垦年限在10年以上的水稻土,土壤腐殖化程度加深,对维持水稻土肥力是不利的。

2.3 开垦年限对水稻土有机质复合状况的影响

有机无机复合状态是表征SOM与矿物质相复合数量及状况的指标。随开垦年限的延长,松结合态腐殖质(LCH)显著降低,棕壤型水稻土降幅为16%,草甸土型水稻土降幅为17% ($P < 0.01$,图4A);紧结合态腐殖质(TCH)显著提高,棕壤型和草甸土型水稻土增幅分别为12%和17% ($P < 0.01$,图4B)。开垦耕作年限改变了结合态碳在复合体中的分布和松结合态碳与紧结合态碳的比例,LCH/TCH比值下降,棕壤型和草甸土型水稻土降幅分别为25%和29%(图4C),水稻土土壤肥力有下降趋势。土壤有机无机复合度(QC)随开垦年限的增加而增加,棕壤型和草甸土型水稻土增幅分别为10%和11%(图4D),不同开垦年水稻土在开垦18年以内,QC和TCH分别

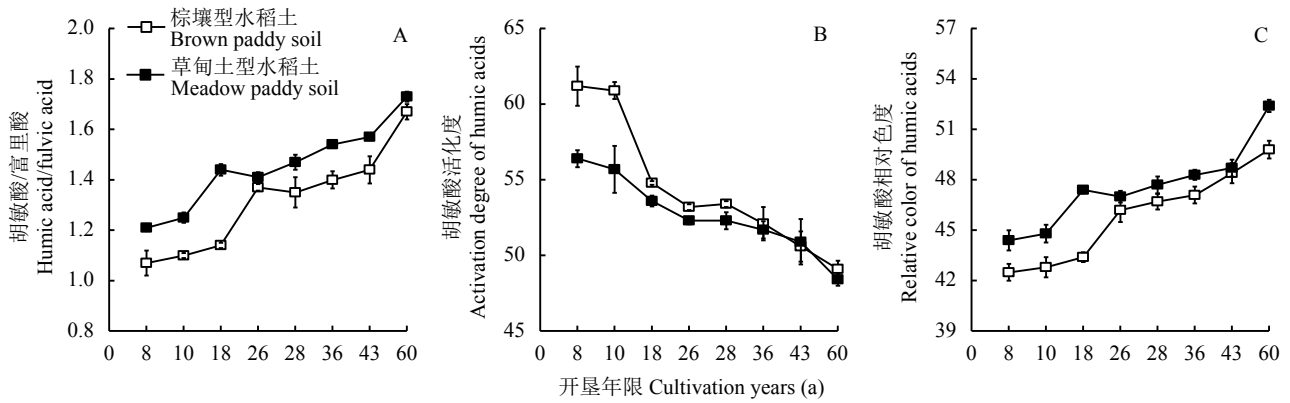


图 3 不同开垦年限水稻土的腐殖酸特性

Fig. 3 Humic acid characteristics of paddy soils under different cultivation years

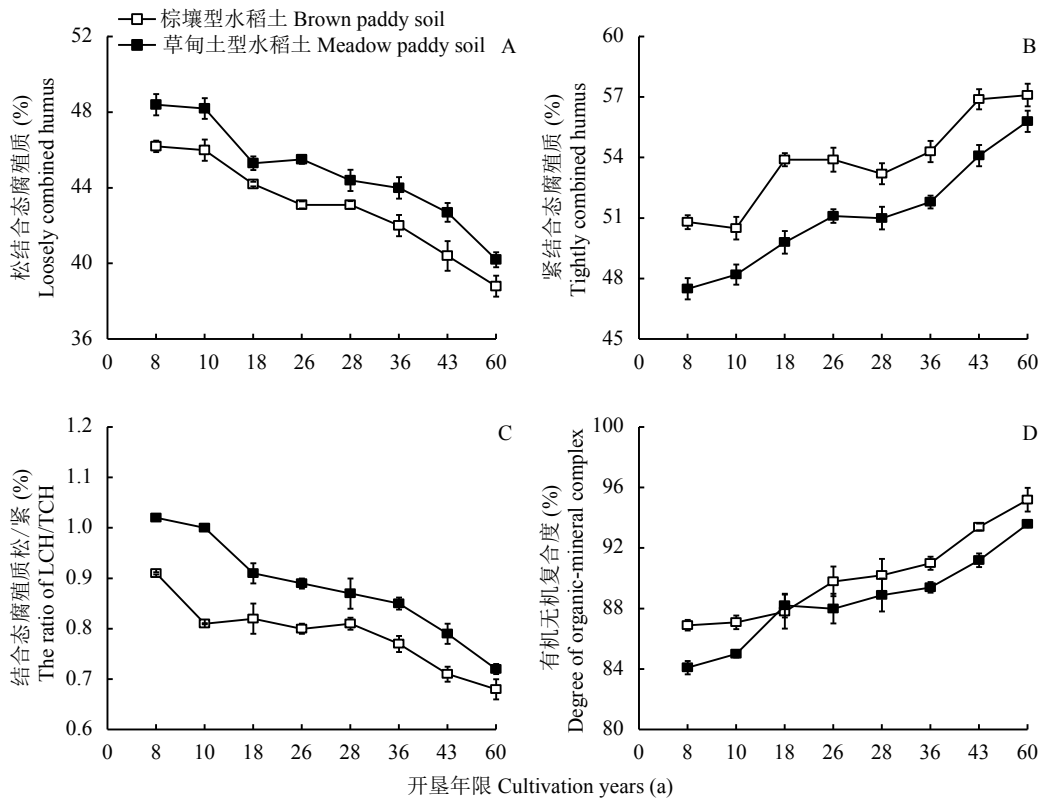


图 4 不同开垦年限水稻土有机无机复合状态

Fig. 4 Organic-mineral composite state of paddy soil under different cultivation years

提高了 1%~4% 和 5%~6%, LCH 降低了 4%~6%, 而在 18~36 年期间, 各种指标趋于稳定, 开垦 36 年以上各种指标又重新出现明显变化 (图 4)。表 3 表明, 土壤中 LCH/TCH 与 ROM/SOM 呈极显著正相关 ($r=0.846^{**}$), 与 Kos 值呈极显著负相关 ($r=-0.835^{**}$)。水稻土复合度在 84% 以上, 未复合的仅有一小部分, 这表明北方水稻土壤有机物质的腐殖化程度均很高, 并且多数与无机复合体形成有机无机复合体。土壤腐殖质的结合形态与土壤中腐殖酸

特性一样, 都是反映土壤有机质品质的重要指标。

3 讨论

3.1 不同开垦年限对水稻土有机质含量及组成的影响

SOM 不同组分其活性不同, 有机质氧化稳定系数 (Kos 值) 是腐殖质分解的难易、腐殖化程度与近期养分的供应状况的体现, 影响土壤肥力的发挥^[33]。在本研究中, ROM/SOM 随开垦年限的增加逐渐降

低, 而 Kos 值的变化趋势与之相反(图 1, 表 3)。ROM 易被利用, ROM 含量随年限的增加而减少, 分解快, 故有机质稳定组分相应占比变大, 有机质 Kos 值也较大, 不利于有机质的氧化和养分释放^[34]。同时, ROM 作为易被微生物分解矿化的那部分有机质, 与 Kos 值、AD、QC 均呈极显著的负相关性(表 3)。综上可知, 水稻土的开垦年限是影响有机质组成和土壤肥力的重要因素。在稻田开垦 60 年间, 土壤中 ROM 含量减少, Kos 增大, 北方淹育型水稻土对养分肥力的供贮、调控能力减弱, 降低土壤肥力水平和养分(土壤和肥料)利用率, 使地力下降。

3.2 不同开垦年限对水稻土腐殖酸特性的影响

影响土壤腐殖酸的提取率(HE/HT)有两方面的因素, 一方面受浸提剂的影响, 另一方面与水稻土的开垦年限有关。常温条件下, 用碱直接从土壤中提取出来的是腐殖物质, 用能使钙发生沉淀的氟化钠盐(NaF)所提取出来的是真正的腐殖酸, 不混杂其他的有机物质。所以 NaF 所提取的腐殖酸量显著低于用碱(0.1 mol/L NaOH + 0.1 mol/L Na₂P₂O₇、0.25 mol/L NaOH)所提取的腐殖酸量^[35]。本研究结果也证实了这一点, 即随着水稻土开垦年限的增加, HE/HT 呈下降趋势, 三种浸提剂的浸提效果变化趋势一致。其中, HE/HT 均是在开垦 10~26 年之间以及 43 年以上, 下降幅度较明显(图 2), 即随水稻土的开垦耕种, 土壤腐殖质品质退化现象在开垦 10~26 年间是一个高峰, 而后退化速度较慢, 到 43 年以后又出现退化高峰。在厌氧条件下, 一方面, 好氧微生物活动受到抑制, 腐殖酸具有特殊的高分子结构, 不易被微生物分解和转化^[36], 另一方面, 以腐殖酸形式存在的碳素具有更强的稳定性, 其含量升高预示着土壤对碳有着更强的固持能力^[37], 使其不断积累或遭受到淋溶下移, 这是随着开垦年限的增加, HE/HT 显著降低的主要原因。

胡敏酸与富里酸的比值(HA/FA)表示腐殖质的聚合程度, 因此, HA/FA 在某种程度上反映 SOM 的稳定性, HA/FA 越大, SOM 越稳定, 腐殖质品质越好^[38]。本研究为高产土壤, 有机质积累不易, 而消耗则很迅速。HA/FA 随开垦年限的增加而增加, 土壤腐殖化程度升高, 但 AD 明显下降, 活性胡敏酸含量降低。导致本研究结果既有外部条件, 又有土壤内部因素。外部条件主要是北方水稻土淹水时间较短, 但落干时的土壤水分, 特别是耕层土壤水分仍接近或超过田间持水量, 一年中始终处于非常丰富的状态, 造成土壤以还原作用为主^[28]。

内部因素主要是在开垦种稻过程中, 耕层土壤中氧化铁、氧化锰活化以及盐基离子(主要是 Ca²⁺、Mg²⁺)淋移, 造成表层土壤发生低价铁、锰离子与盐基离子交换, 从而造成结构较散。

3.3 不同开垦年限对水稻土有机质复合状况的影响

有机无机复合体具有储存土壤中大部分水分和养分的作用^[39]。LCH 来源于土壤中新鲜的有机物质, 易被氧化, 活性高, 其显著降低 16%~17%, 对耕层土壤中有效养分的供给能力减弱; 腐殖物质与矿质土粒复合在一起形成 TCH, 物理、化学及生物学特性比较稳定, 难以转化, 其显著提高 12%~17%, 造成耕层土壤通气透水性不良、结构分散, 或使水稻土耕层还原性物质积累^[40]。LCH/TCH 是衡量腐殖质活性和品质的重要指标^[41], LCH 含量降低, TCH 含量提高, LCH/TCH 比值降低 25%~29%(图 4D), 表明腐殖质活性降低, 水稻土 SOM 品质下降, 水稻土肥力退化^[42-43]。土壤结合态腐殖质主要是以紧结合态和稳结合态形式存在于土壤中, 松结合态含量较低。因此, 土壤 QC 及其结合形态与土壤肥力状况具有密切联系。在水稻土开垦过程中, QC 随水稻耕作年限的延长, 降低或增加的幅度略有不同。有机质品质的退化, 使大部分有机物质与土壤中无机矿质土粒相复合形成较为稳定的有机无机复合体^[41]。综上所述, 土壤有机质的结合形态与土壤中腐殖酸的特性一样, 都是反映土壤有机质品质的重要指标。随开垦年限的延长, 松结合态腐殖质显著降低, 紧结合态腐殖质和有机无机复合度显著提高, 有机质品质退化。

4 结论

土壤有机质组成、存在状态以及腐殖酸特性的变化, 是水稻土是否可获得高产的重要指标。除有机质的数量变化外, 有机质的品质变化也是影响水田肥力状况或产量水平的重要因素。我国北方淹育型水稻土在开垦种稻 60 年间, 随着耕种年限的延长土壤中易氧化有机质含量、胡敏酸的活化度及松结合态腐殖质分别显著降低了 27%~36%、17%~18%、16%~17%, 而胡富比、有机无机复合度则分别显著提高了 43%~56%、10%~11%。说明北方淹育型水稻土的土壤肥力状况有所恶化, 特别是开垦大于 36 年以上的水稻土, 土壤质量有退化趋势, 如不及时加以调节, 土壤肥力将会持续下降。

参 考 文 献:

- [1] 张新乐, 窦欣, 谢雅慧, 等. 引入时相信息的耕地土壤有机质遥感反演模型[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(4): 143–150.
Zhang X L, Dou X, Xie Y H, *et al.* Remote sensing inversion model of soil organic matter in farmland by introducing temporal information[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(4): 143–150.
- [2] 李忠佩, 吴大付. 红壤水稻土有机碳库的平衡值确定及固碳潜力分析[J]. *土壤学报*, 2006, 43(1): 46–52.
Li Z P, Wu D F. Organic C content at steady state and potential of C sequestration of paddy soils in subtropical China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 46–52.
- [3] 刘守龙, 童成立, 吴金水, 等. 稻田土壤有机碳变化的模拟: SCNC 模型检验[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5): 1228–1233.
Liu S L, Tong C L, Wu J S, *et al.* Simulation of changes of soil organic carbon in paddy soils: SCNC model validation[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2006, 25(5): 1228–1233.
- [4] 张琪, 李恋卿, 潘根兴, 等. 近20年来宜兴市域水稻土有机碳动态及其驱动因素[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(2): 236–242.
Zhang Q, Li L Q, Pan G X, *et al.* Dynamics of topsoil organic carbon of paddy soils at Yixing over the last 20 years and the driving factors[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(2): 236–242.
- [5] 邹焱, 苏以荣, 路鹏, 等. 洞庭湖区不同耕种方式下水稻土壤有机碳、全氮和全磷含量状况[J]. *土壤通报*, 2006, 37(4): 671–674.
Zou Y, Su Y R, Lu P, *et al.* Contents of paddy soil organic carbon, nitrogen and phosphorus under different cultivation ways in Dongting Lake region[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4): 671–674.
- [6] 朱咏莉, 吴金水, 周卫军, 等. 亚热带稻田生态系统CO₂排放及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(2): 151–154.
Zhu Y L, Wu J S, Zhou W J, *et al.* CO₂ emission from the paddy ecosystem in subtropical region and its influence factors[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(2): 151–154.
- [7] 李新爱, 童成立, 蒋平, 等. 长期不同施肥对稻田土壤有机质和全氮的影响[J]. *土壤*, 2006, 38(3): 298–303.
Li X A, Tong C L, Jiang P, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil organic matter and total nitrogen in paddy soil[J]. *Soils*, 2006, 38(3): 298–303.
- [8] 刘守龙, 童成立, 张文菊, 等. 湖南省稻田表层土壤固碳潜力模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(1): 118–125.
Liu S L, Tong C L, Zhang W J, *et al.* Simulation of carbon sequestration potential of paddy soils in Hunan province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(1): 118–125.
- [9] 朱利群, 杨敏芳, 徐敏轮, 等. 不同施肥措施对我国南方稻田表土有机碳含量及固碳持续时间的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 87–95.
Zhu L Q, Yang M F, Xu M L, *et al.* Effects of different fertilization modes on paddy field topsoil organic carbon content and carbon sequestration duration in South China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 87–95.
- [10] 侯鹏程, 徐向东, 潘根兴. 不同土地利用方式对农田表土有机碳库的影响—以太湖地区吴江市为例[J]. *南京农业大学学报*, 2007, 30(2): 68–72.
Hou P C, Xu X D, Pan G X. Influence of land use change on topsoil organic carbon stock: a case study of Wujiang Municipality[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2007, 30(2): 68–72.
- [11] Heenan D P, Chan K Y, Knight P G. Long-term impact of rotation, tillage and stubble management on the loss of soil organic carbon and nitrogen from a Chromic Luvisol[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 76(1): 59–68.
- [12] 刘微. 华中地区旱地农田管理措施对土壤有机碳及固碳潜力的影响[D]. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2017.
Liu W. Effects of dryland management measures on soil organic carbon and carbon sequestration potential in central China[D]. Wuhan: MS Thesis of Huazhong Agricultural University, 2017.
- [13] 赵凌, 赵春芳, 周丽慧, 等. 中国水稻生产现状与发展趋势[J]. *江苏农业科学*, 2015, (10): 105–107.
Zhao L, Zhao C F, Zhou L H, *et al.* Current status and development trend of rice production in China[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2015, (10): 105–107.
- [14] 李忠佩, 程励励, 林心雄. 红壤腐殖质组成变化特点及其与肥力演变的关系[J]. *土壤*, 2002, 34(1): 9–15.
Li Z P, Cheng L L, Lin X X. Composition of humus in relation to soil fertility in red soil region[J]. *Soils*, 2002, 34(1): 9–15.
- [15] 任逸文, 肖谋良, 袁红朝, 等. 水稻光合碳在植物-土壤系统中的分配及其对CO₂升高和施氮的响应[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(5): 1397–1404.
Ren Y W, Xiao M L, Yuan H C, *et al.* Allocation of rice photosynthates in plant-soil system in response to elevated CO₂ and nitrogen fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(5): 1397–1404.
- [16] 慈恩, 杨林章, 程月琴, 等. 耕作年限对水稻土有机碳分布和腐殖质结构特征的影响[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 951–966.
Ci E, Yang L Z, Cheng Y Q, *et al.* Effect of cultivation history on distribution of organic carbon and structure of humus in paddy soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 951–966.
- [17] 张雯辉. 吉林前郭盐碱水田区土壤有机碳含量变化和温室气体排放规律研究[D]. 长春: 吉林大学硕士学位论文, 2013, 17–25.
Zhang W H. Changes of soil organic carbon content and greenhouse gas emissions in the former Jilin[D]. Changchun: MS Thesis of Jilin University, 2013, 17–25.
- [18] 章明奎, 常跃畅. 近50年浙江省耕作土壤有机质和酸碱度的变化特征[J]. *环境科学*, 2013, 34(11): 4399–4404.
Zhang M K, Chang Y C. Changing characteristics of organic matter and pH of cultivated soils in Zhejiang province over the last 50 years[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(11): 4399–4404.
- [19] 张玉龙, 李军, 刘鸣达, 等. 辽宁省水田土壤硅素肥力状况的初步研究[J]. *土壤通报*, 2003, 34(6): 543–547.
Zhang Y L, Li J, Liu M D, *et al.* Study on the status of silicon fertility of paddy soils in Liaoning Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(6): 543–547.
- [20] 曲延林, 贾文锦. 辽宁土种志[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1991. 444–523.
Qu Y L, Jia W J. Liaoning soil species[M]. Shenyang: Liaoning University Press, 1991. 444–523.
- [21] 贾文锦. 辽宁土壤[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1992. 509–543.
Jia W J. Liaoning soil[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1992. 509–543.
- [22] 史吉平, 张夫道, 林葆. 长期定位施肥对土壤腐殖质理化性质的影响[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(2): 174–180.

- Shi J P, Zhang F D, Lin B. Effects of long-term located fertilization on the physico-chemical property of soil humus[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(2): 174–180.
- [23] 古小治, 章钢娅, 俞元春, 等. 滨海水稻土腐殖质的组成及随种植时间演变的研究初报[J]. *土壤学报*, 2008, 45(4): 635–640.
- Gu X Z, Zhang G Y, Yu C Y, *et al.* Composition of humus in coastal paddy soil and its succession with cultivation age[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(4): 635–640.
- [24] 郑圣先, 廖育林, 杨曾平, 等. 湖南双季稻种植区不同生产力水稻土肥力特征的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1108–1121.
- Zheng S X, Liao Y L, Yang Z P, *et al.* Studies on fertility characteristics of different productive paddy soils in double-rice cropping regions of Hunan Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5): 1108–1121.
- [25] 王伯伦, 陈健, 等. 1949年以来辽宁省水稻发展形势的分析[J]. *沈阳农业大学学报*, 2002, 33(2): 83–86.
- Wang B L, Chen J, *et al.* Analysis of rice production progress in Liaoning province since 1949[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2002, 33(2): 83–86.
- [26] 郝文英. 中国农业百科全书: 土壤卷[M]. 北京: 农业出版社, 1996. 35–56.
- Hao W Y. China agriculture encyclopedia: soil volume[M]. Beijing: Agriculture Press, 1996. 35–56.
- [27] 徐志强. 辽宁省耕地土壤肥力状况及变化趋势[J]. *辽宁农业科学*, 2012, (2): 29–33.
- Xu Z Q. Soil fertility status and change trend of cultivated land in Liaoning Province[J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2012, (2): 29–33.
- [28] 窦森, 李凯, 崔俊涛, 等. 土壤腐殖物质形成转化与结构特征研究进展[J]. *土壤学报*, 2008, 45(6): 1148–1158.
- Do S, Li K, Cui J T, *et al.* Advancement in the study on formation, transformation and structural characteristics of soil humic substances[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(6): 1148–1158.
- [29] Nascimento V M, Almendros G, Fernandes F M. Soil humus characteristics in virgin and cleared areas of the Paran River basin in Brazil[J]. *Geoderma*, 1992, 54(1–4): 137–150.
- [30] 傅积平. 土壤结合态腐殖质分组测定[J]. *土壤通报*, 1983, 14(1): 36–37.
- Fu J P. Determination of soil combined humus grouping[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1983, 14(1): 36–37.
- [31] 熊田恭一(李庆荣, 译). 土壤有机质的化学[M]. 北京: 农业出版社, 1984.
- Koichi K. (Translate by Li Q R). Chemistry of soil organic matter[M]. Beijing: Agriculture Press, 1984.
- [32] 袁可能, 张友金. 土壤腐殖质氧化稳定性的研究[J]. *浙江农业科学*, 1964, (7): 345–349.
- Yuan K N, Zhang Y J. Study on oxidative stability of soil humus[J]. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 1964, (7): 345–349.
- [33] 杨海波, 陈运, 侯宪文. 生物腐植酸对土壤碳组分的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(20): 137–141.
- Yang H B, Chen Y, Hou X W. Effects of biology humic acid on the component of soil carbon[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(20): 137–141.
- [34] 柳富坤, 袁知洋, 孙志国, 等. 基于GIS的武功山山地草甸土壤有机质空间变异研究[J]. *资源环境与工程*, 2017, 31(2): 158–164.
- Liu F K, Yuan Z Y, Sun Z G, *et al.* Spatial variability of meadow soil organic matter on Wugong Mountain based on GIS[J]. *Resources Environment and Engineering*, 2017, 31(2): 158–164.
- [35] 袁可能. 土壤有机矿质复合体研究 I. 土壤有机矿质复合体中腐殖质氧化稳定性的初步研究[J]. *土壤学报*, 1963, (3): 286–293.
- Yuan K N. Studies on the organo-mineral complex in soil I. The oxidation stability of humus from different organo-mineral complex in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1963, (3): 286–293.
- [36] 关松. 特定培养条件下土壤腐殖质形成与转化的研究[D]. 长春: 吉林农业大学硕士学位论文, 2005.
- Guan S. The study on formation and transformation of soil humus under special incubation condition[D]. Changchun: MS Thesis of Jilin Agricultural University, 2005.
- [37] 韩志卿, 张电学, 王介元, 等. 长期施肥对土壤有机质氧化稳定性动态变化及其与肥力关系的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2000, 23(3): 31–35.
- Han Z Q, Zhang D X, Wang J Y, *et al.* The effect of long-term fertilization on the relationship between dynamic changes of oxidation stability of soil organic matter and soil fertility[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2000, 23(3): 31–35.
- [38] 袁漫漫, 邬刚, 胡润, 等. 秸秆还田配施化肥对稻油轮作土壤有机碳组分及产量影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 27–35.
- Yuan M M, Wu G, Hu R, *et al.* Effects of straw returning plus fertilization on soil organic carbon components and crop yields in rice-rapeseed rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 27–35.
- [39] 孙瑞. 施用有机无机复混肥对退化高寒草地群落组成及土壤肥力的影响[D]. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2016.
- Sun R. Effects of organic and inorganic fertilization on community performance and soil properties in an alpine meadow[D]. Lanzhou: MS Thesis of Lanzhou University, 2016.
- [40] 朱锡明. 施氮水平对风沙土和冲积土有机碳组成及化学稳定性的影响[D]. 长春: 吉林农业大学硕士学位论文, 2015.
- Zhu X M. Effects of different nitrogen level on composition and stability of soil organic carbon of aeolian sandy and alluvial soil[D]. Changchun: MS Thesis of Jilin Agricultural University, 2015.
- [41] 樊腾芳, 周卫军, 郭子川, 等. 澧阳平原古水稻土有机无机复合度及腐殖质结合形态研究[J]. *湖南农业科学*, 2017, (4): 51–54.
- Fan T F, Zhou W J, Guo Z C, *et al.* Organic and inorganic compound and humus combined form in the ancient paddy soil of Liyang Plain[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017, (4): 51–54.
- [42] 接晓辉, 杨丽娟, 周崇峻, 等. 长期施肥对保护地土壤腐殖质总量及各形态之间比值的影响[J]. *土壤通报*, 2009, 40(4): 805–808.
- Jie X H, Yang L J, Zhou C J, *et al.* Effect of long-term fertilization on the contents of combined formation of humus in the protected cultivation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(4): 805–808.
- [43] 夏昕, 石坤, 黄欠如, 等. 长期不同施肥条件下红壤性水稻土微生物群落结构的变化[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 697–705.
- Xia X, Shi K, Huang Q R, *et al.* The changes of microbial community structure in red paddy soil under long term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 697–705.