



移动扫码阅读

马腾辉, 李 蓉, 王 坤, 等. 时间序列下煤矸石充填复垦耕地和林地的土壤碳动态特征[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 260–268.

MA Tenghui, LI Rong, WANG Kun, *et al.* Soil carbon dynamic characteristics of coal gangue-filled reclaimed cropland and forest land under time series[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 260–268.

时间序列下煤矸石充填复垦耕地和林地的土壤碳动态特征

马腾辉^{1,2}, 李 蓉^{1,2}, 王 坤³, 渠俊峰^{1,2,3,4}

(1. 中国矿业大学 江苏省煤基温室气体减排与资源化利用重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 公共管理学院, 江苏 徐州 221116; 3. 徐州市生态文明建设研究, 江苏 徐州 221116; 4. 中国矿业大学 低碳能源研究院, 江苏 徐州 221008)

摘要:为明确复垦后土壤质量与土壤碳循环之间的内在机理, 揭示时间序列下复垦土壤的碳动态特征规律, 研究选取了山东邹城东滩矿区复垦 3、6、9、12 a 的耕地土壤和复垦 3、12 a 的林地土壤为研究对象, 并以矿区内部未受塌陷影响的正常耕地和林地作为对照。通过实地采样并检测土壤总碳(TC)、总氮(TN)、土壤有机碳(SOC)、土壤微生物量碳(MBC)以及土壤理化性质(pH、AN、AP), 探究时间序列下复垦重构土壤在耕地和林地 2 种不同利用方式下的土壤碳动态特征, 及其与土壤理化性质的相关性关系。研究结果表明: 复垦后耕地和林地利用方式下土壤有机碳含量均随复垦时间的增加而逐渐增加, 复垦 3 a 和 12 a 的耕地和林地相比, 耕地各土层深度下土壤有机碳含量均高于相应深度林地土壤; 复垦 12 a 的耕地土壤 0~20 cm 有机碳含量已与对照无显著差异, 复垦 12 a 的林地土壤 40~60 cm 能达到对照水平。各复垦年限耕地和林地土壤中总碳含量均高于对照, 这与复垦土壤中较高比例的土壤无机碳含量有关。复垦后土壤微生物量碳呈持续增长的趋势, 相同复垦年限的耕地和林地土壤相比, 耕地土壤微生物量碳含量均显著高于林地, 且增速更快; 复垦 9 a 的耕地土壤微生物量碳含量已与对照无显著差异, 复垦 12 a 的耕地土壤微生物量碳含量达到 362.59 mg/kg 已显著高于对照, 复垦 12 a 的林地土壤微生物量碳含量达到 110.94 mg/kg 仍显著低于对照。复垦后耕地土壤微生物熵与其土壤微生物量碳含量的变化趋势相似, 均呈现逐渐增加的规律。复垦 6、9 和 12 a 的耕地土壤微生物熵均显著高于对照; 复垦 3 a 和 12 a 的林地土壤微生物熵均显著低于对照。复垦土壤 SOC 与 MBC、TN、AN 呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 与微生物熵 q (MBC)、AP 呈显著正相关 ($p < 0.05$), 与 pH 呈显著负相关 ($p < 0.05$); MBC 与 TN、AN 呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 与 q (MBC)、AP 呈显著正相关 ($p < 0.05$), 与 TC 呈显著负相关 ($p < 0.05$)。pH 与 AN、AP 均呈极显著负相关关系 ($p < 0.01$), 与 TN 呈显著负相关性 ($p < 0.05$)。主要结论为伴随着复垦时间的持续, 复垦后 2 种土地利用方式下土壤有机碳和微生物量碳含量均有不同程度的积累和恢复, 而复垦后合理的农业耕作活动更有助于土壤质量的持续改善。

关键词: 时间序列; 充填复垦; 不同利用方式; 土壤碳动态

中图分类号: TD88; X171 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)05-0260-09

Soil carbon dynamic characteristics of coal gangue-filled reclaimed cropland and forest land under time series

MA Tenghui^{1,2}, LI Rong^{1,2}, WANG Kun³, QU Junfeng^{1,2,3,4}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Coal-Based Greenhouse Gas Control and Utilization, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Public Policy and Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Xuzhou Institute of Ecological Civilization Construction, Xuzhou 221008, China; 4. Low Carbon Energy Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

收稿日期: 2022-05-03 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.ST21-024

基金项目: 江苏省煤基温室气体减排与资源化利用重点实验室开放基金资助项目(2020KF01)

作者简介: 马腾辉(1994—), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生。E-mail: matenghui925@163.com

Abstract: In order to clarify the intrinsic mechanism between soil quality and soil carbon cycling after reclamation and to reveal the characteristic patterns of carbon dynamics of reclaimed soils under time series, the cultivated soils of 3, 6, 9 and 12 a reclaimed Dongtan mine area in Zoucheng, Shandong Province and the forested soils of 3 a and 12 a reclaimed were selected for this study, and the normal cultivated and forested soils within the mine area that were not affected by the collapse were used as controls. Soil carbon dynamics characteristics of reclaimed reconstructed soils under two different utilization methods of cropland and forest land under time series and its correlation relationship with soil physicochemical properties were investigated by field sampling and testing soil total carbon (TC), total nitrogen (TN), soil organic carbon (SOC), soil microbial quantity carbon (MBC) and soil physicochemical properties (pH, AN, AP). The results of the study showed that the soil organic carbon content of both cultivated land and forest land after reclamation increased gradually with the increase of reclamation time, and compared with the cultivated land and forest land after reclamation for 3 a and 12 a, the soil organic carbon content of cultivated land at all soil depths was higher than that of forest land soil at the corresponding depths; the organic carbon content of cultivated land soil 0-20 cm after reclamation for 12 a was not significantly different from that of the control, and the forest land soil 40-60 cm after reclamation for 12 a could reach the control level. The organic carbon content of 40-60 cm of forest soils reclaimed for 12 a was not significantly different from that of the control. The total carbon content of both cropland and forest soils was higher than the control at all reclamation years, which was related to the higher proportion of soil inorganic carbon content in the reclaimed soils. The soil microbial carbon content of cultivated soils was significantly higher than that of forested soils in the same reclamation period, and the rate of increase was faster; the soil microbial carbon content of cultivated soils was no longer significantly different from that of the control at 9 a of reclamation, while the soil microbial carbon content of cultivated soils reached 362.59 mg/kg at 12 a of reclamation, which was significantly higher than that of the control. The soil microbial carbon content of the forest land was 110.94 mg/kg, which was still significantly lower than that of the control. The trends of soil microbial entropy of cultivated land and its soil microbial carbon content after reclamation were similar, both showing a gradual increase. The microbial entropy of cultivated soils at 6, 9 and 12 a of reclamation were significantly higher than the control; the microbial entropy of forest soils at 3 a and 12 a of reclamation were significantly lower than the control. Reclamation soil SOC was highly significantly positively correlated with MBC, TN, and AN ($p < 0.01$), significantly positively correlated with $q(\text{MBC})$ and AP ($p < 0.05$), and significantly negatively correlated with pH ($p < 0.05$); MBC was highly significantly positively correlated with TN and AN ($p < 0.01$), significantly positively correlated with $q(\text{MBC})$ and AP ($p < 0.05$), and significantly correlated with TC pH showed highly significant negative correlations with AN and AP ($p < 0.01$) and significant negative correlations with TN ($p < 0.05$). The main conclusion was that along with the duration of reclamation, soil organic carbon and microbial carbon contents accumulated and recovered to different degrees under both land use methods after reclamation, and reasonable agricultural farming activities after reclamation contributed more to the continuous improvement of soil quality.

Key words: time series; infill reclamation; different utilization methods; soil carbon dynamics

0 引 言

中国作为世界上最大的煤炭生产国和消费国,其产量和消耗量约占全球总量的一半,煤炭资源的长期开采为经济发展带来重大贡献的同时也引发了许多地质环境问题,特别是中东部高潜水位矿区的井工开采活动造成了大面积土地塌陷^[1],而该地区是典型的煤炭开采与农业生产重叠区域,土地塌陷不仅破坏了大量优质农田,威胁国家粮食安全^[2],并且塌陷导致的土地荒废和积水会严重破坏原有生态系统碳循环^[3]。为缓解煤炭开采造成的耕地压力、恢复土壤质量并保持区域生态系统的稳定,针对塌陷的土地采取以煤矸石或粉煤灰等充填的方式进行了大量复垦还田工程,但与自然土壤相比,复垦土壤为重构土壤,其土壤结构、理化性质和有机碳含量会因为复垦过程中的机械碾压和压实等过程受到较大改变^[4],并对植物和微生物生长状况产生巨大影响^[5]。作为不同于自然土壤生态系统的具有特殊结构和功

能的有机整体,其结构和功能的特殊性决定了复垦区重构土壤的有机碳特征及其循环过程必然区别与其他自然生态系统^[6-7]。

土壤有机碳(SOC)作为表征土壤肥力变化的一个重要指标,是作物高产稳产和农业可持续发展的基础^[8],在矿区复垦土壤的早期成土过程与生态功能重建中起着关键作用^[9],其质量和数量影响了土壤物理化学特征、生物特征及其过程,并在土壤肥力、环境保护、农业可持续发展以及全球碳平衡等方面都有重要作用和意义^[10-11]。早期的研究表明,采煤沉降导致的土地损毁会使土壤有机碳快速下降,其有机碳降幅最高可达81%^[12],在复垦初期土壤中的碳密度下降明显,随着复垦年限的增加,复垦土壤固碳能力会逐渐提高,使退化土壤由碳排放的源重新变成重要的碳汇。然而与土壤有机碳的缓慢恢复相比,土壤微生物量碳等活性有机碳指标对复垦土壤的早期变化更为敏感^[13]。并且不同复垦方式及利用管理方式的复垦土壤间微生物量碳储量有显著差异^[14]。

另外,有研究表明,尽管时间对土壤碳库和相关养分指标的恢复具有积极的影响,但由于土壤母质、复垦过程和复垦后土地利用方式的不同,其恢复规律不尽相同^[15-16]。

当前关于采煤沉陷后复垦土壤碳的研究成为热点,而相同尺度下研究复垦耕地和林地土壤碳特征的极少。因此,为推动矿区复垦地可持续利用和发展,缓解当前固碳减排压力,积极开展充填复垦土壤碳特征研究显得尤为重要。旨在揭示复垦重构土壤在耕地和林地2种利用方式下土壤碳库的动态特征,探究复垦后土壤有机碳变化规律及其相关性因素,以期进一步加深对全球背景下复垦土壤碳循环的响应及其机制的理解。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省邹城市西北部东滩矿区采煤沉陷复垦地(116°46'30"~117°28'54"E, 35°8'12"~35°32'54"N),属暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,雨热同期,年平均降雨量686.5 mm,年平均无霜期209.3 d,年平均气温14.9℃,日平均气温≥10℃的积温为4696.7℃,自然土壤类型为黄潮亚土。

东滩矿区塌陷地从2001年开始采用表土剥离-煤矸石充填复垦法陆续复垦。先在地表未沉陷或沉陷初期预先剥离表土堆存,待采煤沉陷稳定后,采用全厚充填法,将沉陷区回填至设计标高并平整压实,平均矸石充填层厚度4~6 m;最后将预先剥离并储存的表土进行回填并平整,土壤类型为潮土,上层覆土厚度约80 cm,复垦后为土地利用类型有耕地、林地和撂荒地,耕地以大豆-小麦轮作为主,林地以种植速生杨为主,撂荒地复垦后无人管理,杂草丛生。由于塌陷区复垦工程在不同年份开展,为研究提供了十分完善的时间序列。同时,所选样地除复垦年限不同外,其地形、气候、土壤母质、种植模式、耕作方式、施肥方式等条件基本一致。

1.2 土壤样品采集与处理

在研究区内控制立地因子基本一致的条件下,试验选取了4种复垦年限(3、6、9、12 a)的样地采集土壤样品(图1),研究区复垦土壤主要有耕地和林地两种土地利用类型,其中复垦林地只选取了3 a和12 a年限的样地。采用S形多点采样法,每个年限样地各设置6个采样点,采样前清除地表植被及杂物,每个样点用内径3.5 cm、长为80 cm不锈钢取样器分别取0~20、20~40和40~60 cm土壤各6管,并按采样深度混匀为一个样品。同时,以矿区

内部未受塌陷影响的正常耕地和林地作为对照,耕地轮作方式以及林地种植树种与研究区相同。

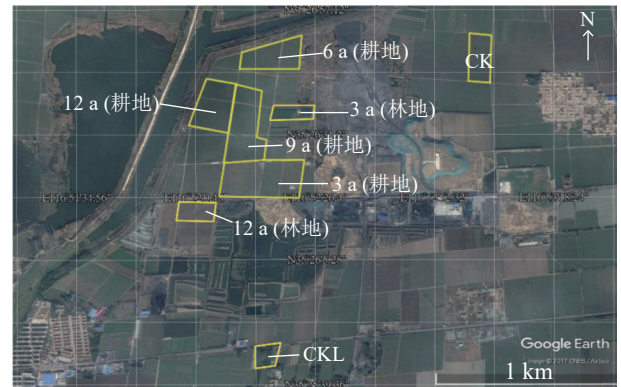


图1 研究区位置及土壤样地分布

Fig.1 Location and soil sampling of the study area

样品密封保存带回实验室后分为两部分,一部分样品室内自然风干,除去土壤动植物残体和矸石等杂质,研磨过2 mm筛后混合均匀,用于测定土壤基础理化性质;另一部分土壤鲜样用无菌袋密封后于4℃冷藏,用于测定土壤微生物量碳,由于试验条件的限制,仅测定了表层0~20 cm深度土样的微生物量碳。

1.3 分析测试方法

土壤pH值(水土比2.5:1)用数字酸度计测定;土壤碱解氮(AN)采用碱扩散法测定;土壤速效磷(AP)采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;土壤有机碳(SOC)的测定采用重铬酸钾-外加热法^[17],土壤微生物量碳(MBC)测定采用氯仿熏蒸K₂SO₄提取-SOC仪测定法^[18];MBC=(熏蒸浸提液中SOC-未熏蒸浸提液中SOC)/0.411。土壤总碳(TC)、总氮(TN)的含量用碳氮元素分析仪(FlashEA 1112 Series NC Analyzer, Thermo Fisher Scientific, USA)分析测试;土壤无机碳(SIC)的含量通过总碳(TC)减去有机碳(SOC)含量计算得到。

1.4 数据分析

数据经Excel 2016整理后,采用SPSS 18.0软件的单因素方差分析(One-way ANOVA)和Duncan检验对不同复垦年限及对照之间的土壤性质指标进行方差分析及差异显著性检验,用Person分析法进行相关分析,使用Sigmaplot12.0软件作图。结果为平均值±标准误。

2 结果和分析

2.1 土壤理化特征

从表1可以看出,不同复垦年限的耕地和林地土壤pH、AN、AP和TN的变化特征各不相同。其

中, pH 值差异不显著, 均呈碱性, 且与对照相比显著偏高。复垦耕地土壤 AN 含量随着复垦时间呈持续增长的趋势, 但均低于对照; 复垦耕地表层 0~20 cm 土壤 AP、TN 含量随复垦时间呈递增趋势, 复垦到 9 a

后耕地表层土壤 TN 含量已与对照无显著差异, 到 12 a 时土壤表层 AP 含量与对照耕地差异不显著。而复垦林地土壤各层 AN、AP 含量均呈现 12 a<3 a, TN 含量为 3 a>12 a, 且均与对照相比差距较大。

表 1 复垦土壤的一些基本特性
Table 1 Some basic properties of reclaimed soils

复垦年限	土地利用类型	土壤深度/cm	pH	碱解氮含量/(mg·kg ⁻¹)	速效磷含量(mg·kg ⁻¹)	总氮含量/(g·kg ⁻¹)
3 a	耕地	0~20	8.40±0.04a	36.38±4.43e	8.85±5.17e	0.79±0.06b
		20~40	8.35±0.07a	16.23±2.08h	1.35±0.55h	0.41±0.03e
		40~60	8.25±0.09a	18.42±4.55h	1.44±0.58h	0.60±0.08c
6 a	耕地	0~20	8.63±0.04a	51.39±2.33c	10.77±1.39d	0.78±0.02b
		20~40	8.50±0.05a	31.43±2.30f	2.91±0.15g	0.51±0.05d
		40~60	8.30±0.07a	26.60±2.94g	3.24±0.57g	0.51±0.08d
9 a	耕地	0~20	8.69±0.05a	53.26±3.78c	14.78±1.81c	0.86±0.02ab
		20~40	8.44±0.01a	39.43±2.91e	3.40±0.41g	0.60±0.06c
		40~60	8.33±0.03a	38.05±3.30e	2.49±0.22g	0.60±0.10c
12 a	耕地	0~20	8.49±0.07a	63.22±2.80b	19.44±4.86a	1.06±0.03a
		20~40	8.25±0.07a	39.08±2.83e	4.47±1.15g	0.82±0.08b
		40~60	8.10±0.06a	33.62±2.76f	1.45±0.42h	0.83±0.03b
3 a	林地	0~20	8.35±0.05a	43.24±2.90d	3.46±0.39g	0.48±0.06de
		20~40	8.35±0.02a	37.12±2.86e	2.69±0.59g	0.40±0.05e
		40~60	8.28±0.03a	42.28±4.53d	3.98±0.93g	0.42±0.05e
12 a	林地	0~20	8.41±0.03a	35.53±3.72e	1.94±0.10h	0.59±0.11c
		20~40	8.37±0.03a	19.96±4.72h	1.92±0.26h	0.47±0.07de
		40~60	8.43±0.02a	15.90±2.60h	2.25±0.33h	0.48±0.04de
CKL	林地	0~20	7.32±0.20b	66.40±2.60b	18.77±5.96b	1.12±0.05a
		20~40	7.54±0.14b	49.57±1.19c	4.15±0.41g	0.69±0.03c
		40~60	7.72±0.09b	33.83±1.53f	1.80±0.20h	0.60±0.04c
CK	耕地	0~20	6.94±0.15c	92.49±2.86a	23.91±3.23a	0.97±0.03a
		20~40	7.23±0.19b	43.26±5.64d	5.68±2.00f	0.75±0.04b
		40~60	7.64±0.13b	44.09±3.19d	1.74±0.21h	0.65±0.05c

注: 结果为平均值±标准误, $p<0.05$; CK为对照耕地; CKL为对照林地; 同一列相同小写字母表示差异不显著。

从土壤深度变化上看, 复垦土壤 pH、TN 值均呈现表层高于下层, 随着深度的增加土壤 pH 缓慢减小, 这与对照土壤完全相反, 而 TN 含量变化趋势与对照相同。整体而言, 复垦耕地土壤 AN 随着土壤深度的下降而下降, 且不同土壤深度的土壤 AN 含量均低于对照; 而 AP 含量均呈现表层显著高于下层, 这与对照相似。复垦林地土壤 AN 含量, 直到 12 a 时才呈现于对照相同规律, 但相比对照仍有显著差异, 而复垦林地土壤 AP 含量与对照相比无明显变化规律。

2.2 时间序列下的土壤有机碳特征

由表 2 及图 2 所示, 复垦耕地和复垦林地不同土壤深度的 SOC 含量均随时间呈增加的趋势。相同复垦年限下, 耕地土壤 SOC 含量较高于林地, 复垦 12 a 后耕地各层土壤 SOC 含量为林地土壤的 1.25~1.51 倍。在土壤深度变化上, 从 0~20 cm 到 20~40 cm 再到 40~60 cm, 除了复垦耕地 3 a 外, 其余复垦时间内土壤 SOC 含量均呈现明显的上层高于下层, 耕地高于林地, 复垦低于对照。

表2 复垦耕地和复垦林地的土壤有机碳含量

Table 2 Soil organic carbon content of reclaimed cropland and reclaimed forest land

复垦年限	土地利用类型	有机碳含量/(g·kg ⁻¹)		
		土壤深度0~20 cm	土壤深度20~40 cm	土壤深度40~60 cm
3 a	耕地	5.83±1.12c	2.56±0.39e	3.12±0.91e
6 a	耕地	6.32±0.37b	3.97±0.45de	3.24±0.74e
9 a	耕地	6.81±0.49b	5.12±0.41d	4.37±0.43d
12 a	耕地	7.98±0.40a	5.62±0.61c	5.38±0.14c
3 a	林地	4.29±0.56d	2.39±0.42e	2.00±0.42f
12 a	林地	5.28±0.61c	4.51±1.09d	4.19±0.67e
CKL	林地	8.38±0.48a	5.62±0.67c	3.68±0.53e
CK	耕地	9.09±0.41a	6.92±0.86b	6.03±0.76b

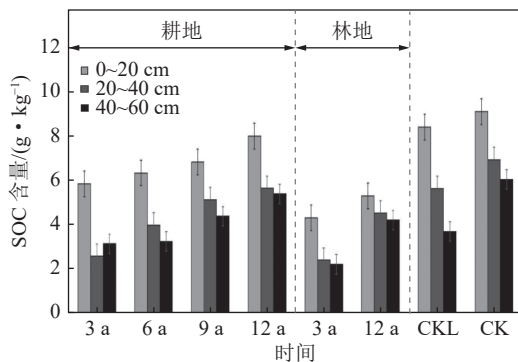


图2 不同土壤深度的复垦耕地和复垦林地SOC含量变化

Fig.2 Changes in soil organic carbon of reclaimed cropland and reclaimed forest land with different soil depths

从时间序列上来看,在0~20 cm土壤深度上,复垦耕地SOC含量的增长率为8.4%、7.75%、17.18%,呈波动上升趋势,由3 a到12 a的增长率为36.88%,而复垦林地的SOC含量由3 a到12 a的增长率为23.07%;在20~40 cm土壤深度上,复垦耕地SOC含量的增长率为55.07%、28.97%、9.8%,呈快速下降趋势,由3 a到12 a的增长率为119.53%,而复垦林地的SOC含量由3 a到12 a的增长率为88.7%;在40~60 cm土壤深度上,复垦耕地SOC含量的增长率为3.8%、34.88%、23.11%,增长率先升后降,由3~12 a的增长率为72.44%,而复垦林地的SOC含量由3 a~12 a的增长率为90.45%。由此可见,在0~20 cm、20~40 cm土壤深度范围内,复垦耕地的SOC含量以及增长率都要显著高于复垦林地,而在40~60 cm土壤深度范围内,复垦耕地SOC含量虽然高于复垦林地,但同期增长率却有所不及。复垦到12 a时,耕地土壤0~20 cm的SOC含量与对照相比差异不显著,林地土壤40~60 cm的SOC含量与对照相比差异不显著。随着复垦时间的增长,在

0~20 cm土壤深度上,耕地土壤与对照相比SOC含量分别偏低35.86%、30.47%、25.08%、12.21%,林地土壤与对照相比分别偏低48.81%、36.99%。在20~40 cm土壤深度上,耕地土壤与对照相比SOC含量分别偏低63.01%、42.63%、26.01%、18.79%,林地土壤与对照相比分别偏低57.47%、19.75%。在40~60 cm土壤深度上,耕地土壤与对照相比SOC含量分别偏低48.26%、41.27%、27.53%、10.78%,林地土壤与对照相比在3 a时偏低40.22%,而在12 a时增长了13.86%。说明土壤SOC含量随着时间不断增加,逐渐接近对照水平。

2.3 时间序列下的土壤总碳和土壤无机碳特征

从图3—图6中可以看出,复垦耕地和林地土壤TC含量以及SIC占TC比例整体都高于对照。复垦耕地土壤各层TC含量在3 a和6 a期间显著高于9 a和12 a期间,整体呈波动下降趋势,这主要与SIC含量的变化有关。复垦林地的土壤TC含量在各层都表现为持续上升。复垦耕地在3 a到9 a期间,SIC占TC的比例在0~20 cm的情况为:65.30%、64.73%、26.30%。在20~40 cm的情况为:86.21%、75.06%、32.43%。在40~60 cm的情况为:80.61%、81.47%、48.22%。可以看出在复垦初期无机碳占比巨大,这可能于煤矸石混杂有关,但随着时间增长各土壤深度的SIC含量有明显的波动下降趋势。而复垦林地在3 a~12 a期间,除0~20 cm深度SIC占TC比例有所增长外,其余都呈下降趋势。

2.4 时间序列下的土壤微生物量碳和微生物熵特征

从图7中可以看出,复垦后的土壤微生物量碳(MBC)呈增长趋势。复垦到9 a时耕地土壤MBC已与对照无显著差异,到12 a时已显著高于对照含量。复垦耕地与林地相比,土壤MBC含量增速更快;相同复垦年限的耕地和林地土壤相比,耕地土壤

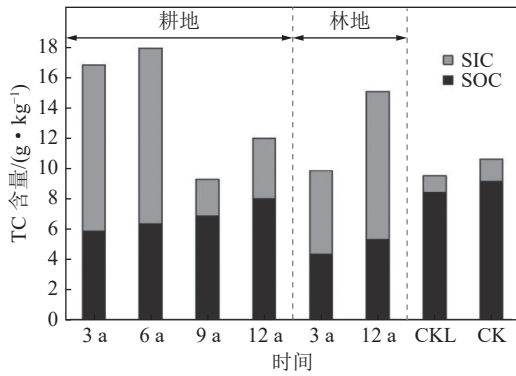


图 3 0~20 cm 深度复垦土壤 TC 含量变化
Fig.3 Variation of TC content of reclaimed soil at 0-20 cm depth

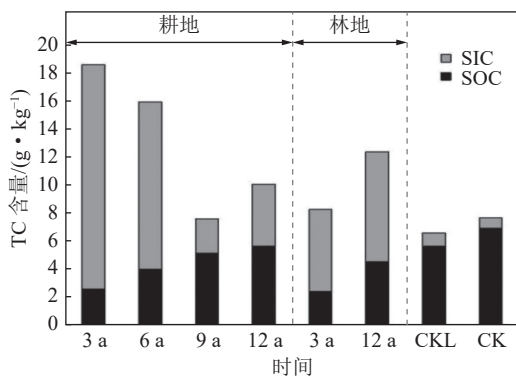


图 4 20~40 cm 深度复垦土壤 TC 含量变化
Fig.4 Variation of TC content of reclaimed soil at 20-40 cm depth

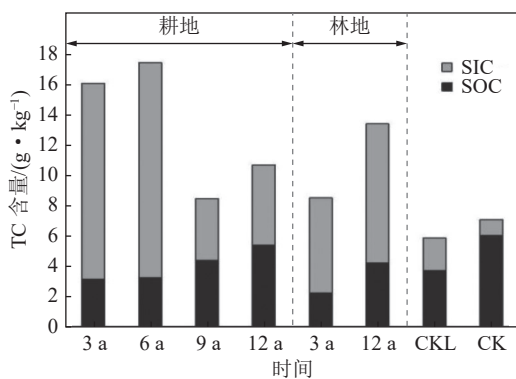


图 5 40~60 cm 深度复垦土壤 TC 含量变化
Fig.5 Variation of TC content of reclaimed soil at 40-60 cm depth

MBC 含量均显著高于林地,复垦到 12 a 时林地土壤 MBC 含量仍显著低于对照。

耕地土壤微生物熵 ($q(\text{MBC})$) 与 MBC 变化趋势相同,均呈现逐渐增长的规律。复垦 6、9 和 12 a 的耕地土壤微生物熵均显著高于对照;复垦 3 a 和 12 a 的林地土壤微生物熵均显著低于对照林地。与此同时,复垦 3 a 的林地土壤微生物熵要高于复垦耕地。

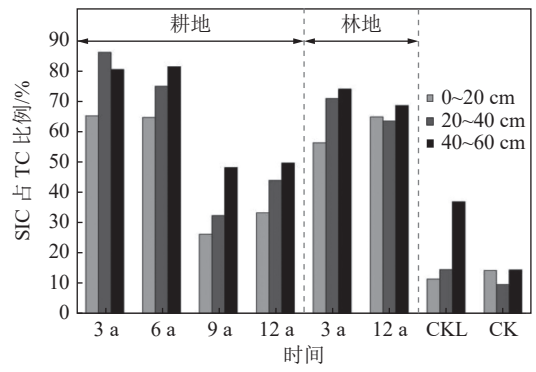
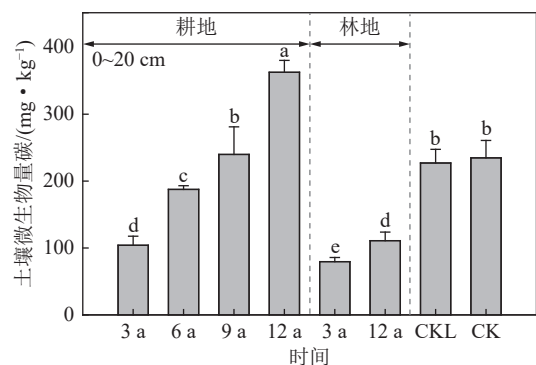
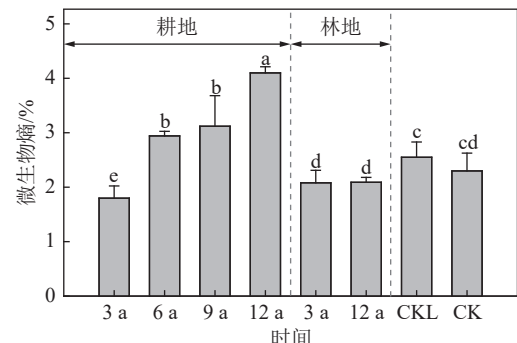


图 6 SIC 占 TC 比例示意
Fig.6 Schematic diagram of SIC to TC ratio



(a) 土壤微生物量碳



(b) 土壤微生物熵

图 7 复垦耕地和复垦林地土壤微生物量碳和微生物熵的变化

Fig.7 Changes in microbial carbon and microbial entropy in soils of reclaimed cropland and reclaimed forest land

2.5 时间序列下的土壤碳与土壤物理和化学特性之间的相关性分析

由表 3 的相关分析结果表明,复垦土壤 SOC 与 MBC、TN、AN 呈极显著正相关关系 ($p < 0.01$),与 $q(\text{MBC})$ 、AP 均呈显著正相关性 ($p < 0.05$),与 pH 呈显著负相关关系 ($p < 0.05$)。MBC 与 TN、AN 呈极显著正相关关系 ($p < 0.01$),与 $q(\text{MBC})$ 、AP 均呈显著正相关性 ($p < 0.05$),与 TC 呈显著负相关关系 ($p < 0.05$)。pH 与 AN、AP 均呈极显著负相关关系 ($p < 0.01$),与 TN 呈显著负相关性 ($p < 0.05$)。

表3 土壤碳和土壤基本属性之间的相关关系
Table 3 Correlation among soil carbon and soil basic properties

相关系数	SOC	MBC	q(MBC)	TC	TN	pH	AN	AP
SOC	1							
MBC	0.479**	1						
q(MBC)	0.315*	0.313*	1					
TC	-0.068	-0.317*	-0.331*	1				
TN	0.483**	0.630**	0.657**	-0.163	1			
pH	-0.327*	-0.116	0.027	0.077	-0.405*	1		
AN	0.569**	0.573**	0.610**	-0.362*	0.758**	-0.510**	1	
AP	0.334*	0.431*	0.438*	0.007	0.540**	-0.529**	0.479**	1

注: ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3 讨论

时间是土壤形成过程的关键驱动因素^[19], 研究中复垦土壤 SOC 含量随着复垦时间逐渐增加, 表明在相似的成土条件下, 时间对于复垦土壤 SOC 演变有积极的影响^[20], 反映复垦土壤有巨大的固碳潜力。研究中, 虽然土壤 SOC 含量随复垦年限不断增加, 但增长速率较为缓慢, 复垦 12 a 时的耕地和林地土壤 SOC 含量仅为复垦 3 a 的 1.2 ~ 2.2 倍, 且均低于对照土壤。ZHAO 等^[21] 的研究表明露天矿区林草生态系统重建下 SOC 含量增长较快, 复垦 13 a 时的 SOC 含量已达到复垦 4 年时的 3.1 倍。这多是由于林草生态系统重建过程中, 地上植被生物量及凋落物持续增加并腐殖化, 可有效改善土壤质地, 促进土壤 SOC 的快速积累; 而在农业利用方式下, 虽然有根系和凋落物不断进入土壤以及大量有机肥和化肥的施用, 但每年地上作物绝大部分被移除, 同时机械翻耕又进一步破坏土壤团聚体结构, 在一定程度上减缓了土壤 SOC 的积累速率^[7]; 研究中复垦林地土壤 SOC 含量增速也较慢, 这多与林草混合生态系统和纯单一树种林地生态系统对土壤 SOC 恢复的影响不同有关, 在林草混合生态系统中, 植物根系在 0 ~ 60 cm 均有大量分布, 且凋落物种类和数量均较多^[22], 并且王蕾等^[23] 的研究表明, 在煤矸石复垦土壤中复垦草地土壤总有机碳含量高于复垦林地, 所以林草生态系统中土壤 SOC 增长速度高于本研究样地。另外, 本研究中, 复垦林地各层 SOC 含量均低于对应复垦年限耕地土壤, 与对照林地相比, 仅 40 ~ 60 cm 深度的 SOC 含量高于对照, 这说明与农业利用方式下相比, 林地利用方式下无肥料的施加会更

多的限制 0 ~ 40 cm 复垦土壤 SOC 的增长速率。与 0 ~ 40 cm 土层不同, 林地 40 ~ 60 cm 深度土壤 SOC 含量与对照林地无显著差异, 这主要是由于林地中树木根系的持续增加, 使根系分泌物等经过分解转化以及合成作用形成更多的土壤腐殖质^[24]。

在本研究中, 尽管复垦土壤 SOC 含量显著低于对照农田, 但 TC 含量高于对照农田。主要在于两种利用方式下复垦土壤 SIC 含量较高, 在 2.43 ~ 16.02 g/kg, 占 TC 的 26.30% ~ 86.21%。这与 CHAUDHURI^[19] 等的研究不同, 该研究发现在美国西弗吉尼亚州的复垦土壤中 SIC 含量低于 TC 含量的 4%, 这与复垦过程中大量矸石的混杂有关。相关分析表明, 土壤 SIC 含量与 SOC、AN 呈显著负相关, 与 pH 呈显著正相关, 这说明土壤中较高的 SIC 含量多是由于混入矸石的影响, 而新鲜矸石往往偏碱性, 表层矸石在不断分解的同时, 其中的 Ca、Mg、K 等碱性金属化合物也会部分溶解, 不断消耗土壤中 H⁺, 使复垦土壤偏碱性, 这与胡振琪等^[25] 研究结果相似。同时, 复垦后耕地和林地利用方式下, 土壤 SIC 含量较高的情况均没有得到改善, 这也促使我们对未来复垦工艺提出更高的要求, 从而更加科学合理地开展矿区复垦工作。

土壤 MBC 在植物养分利用、有机质分解和土壤养分循环过程中发挥着关键作用, 其既是土壤 C、N、P 等养分快速的源和库, 也是污染物降解的媒介, 同时是评价土壤质量和肥力综合状况的重要指标之一^[26-27]。研究中土壤 MBC 含量在复垦 3 ~ 12 a 期间耕地从 104.07 mg/kg 增至 362.59 mg/kg, 林地从 79.57 mg/kg 增至 110.94 mg/kg, 2 种利用方式下土壤 MBC 含量均呈明显的增长趋势, 其中复垦 9 a 的耕地土壤 MBC 含量已与对照无显著差异, 复垦 12 a 的耕地土壤 MBC 含量已显著高于对照, 这与多数研究成果相似^[15-16]。研究中, 复垦到 12 a 时林地土壤 MBC 含量仍显著低于对照水平, 与樊文华等^[28] 的研究相似, 这说明复垦后的耕作施肥等活动相比与林地、草原的自然状态下会更利于土壤微生物的增长。同时相关分析显示, 土壤 MBC 含量与 SOC 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 这与多数学者^[29-31] 的研究结果一致, 表明土壤有机质是土壤微生物的重要能量来源, 而复垦后耕作过程中的有机碳输入会极大促进微生物群落的生长, 土地利用类型的变化影响凋落物分解向土壤微生物提供可利用碳的数量和质量, 刺激群落的活性, 从而促使耕地土壤 MBC 含量更快速的增长。

土壤 q(MBC) 是指土壤微生物量碳与土壤有机

碳总量的比值,可以解释为底物碳的可利用度或被微生物固定的总有机碳的比例^[32],它将微生物可矿化碳与微生物量有机结合起来,是反映环境因素、管理措施等变化对微生物碳库影响的一个敏感性指标^[33],能有效地指示土壤养分的变化,同时能够预测土壤有机质长期变化或监测土地退化及恢复,可以避免由于土壤有机质含量的差异而难以说明的缺点^[34-35]。研究指出,土壤 $q(\text{MBC})$ 越高则土壤碳积累越多,且随恢复微生物种群结构和数量发生改变^[36]。研究表明,复垦后耕地土壤的 $q(\text{MBC})$ 呈增加的趋势,且复垦6a后已高于对照土壤。这说明随复垦土壤的农业利用进程,土壤碳素有效性和土壤固碳能力相应增强,复垦后耕地土壤环境逐步改善,更利于土壤微生物的生存,微生物数量开始逐步增加,且复垦耕地土壤环境与对照相比更有利于微生物的生存,这是否与复垦土壤环境中特定的微生物群落有关,值得进一步研究。同时研究表明覆土厚度对复垦土壤内的微生物活动会产生一定的影响,这也值得在研究区内进一步探索,也为复垦工艺的改进提供了基础。复垦3a的林地土壤 $q(\text{MBC})$ 高于同复垦年限耕地,这说明复垦初期(3a)林地土壤环境更有利于微生物生长;复垦3a和12a林地土壤 $q(\text{MBC})$ 差异不显著,且均低于对照,多是由于林地土壤环境无人干扰,微生物群落可以较快达到相对均衡稳定的状态,复垦后土壤微生物群落的演替规律需要进一步的研究。

4 结 论

1)时间对矿区复垦耕地土壤和林地土壤有机碳的积累以及微生物量碳的恢复具有积极的作用。土壤速效磷、碱解氮和全氮含量均随复垦年限有增加的趋势,但复垦后较高的土壤pH环境可能会限制土壤质量的改善,影响土壤养分转化及其有效性,建议合理规划灌排配套设施,调节土壤中水分循环,洗淋排除土壤中的盐分,从而降低PH值,同时也可通过增施有机肥、绿肥、改良剂等来改善土壤理化性质。

2)复垦后土壤总碳含量整体上与对照农田无明显差异,甚至高于对照农田,这与复垦土壤中较高比例的无机碳含量有关,这也对今后复垦工艺提出了更高的要求。建议在表土剥离的过程中要注意保存和控制好表土的量,选择合适的覆土厚度对复垦土壤生产力也会有一定的影响,在复垦过程中要因地制宜进行土壤深松并逐年加深耕层,调整土壤构造状况,使土壤疏松通气,增强肥料溶解能力,加速土

壤有机碳的积累,减少充填材料产生的负面影响,保证复垦土壤的生产力。

3)2种土地利用方式下土壤微生物量碳均随复垦年限不断增加,而与耕地土壤微生物熵逐年增加不同,林地土壤微生物熵相对一致,这种差异与不同土地利用方式中物质循环过程特性和人为施肥管理水平等活动均有不同程度的关系,而关于复垦后土壤微生物群落的演替规律仍有待于进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] HU Z, YANG G, WU X, *et al.* Farmland damage and its impact on the overlapped areas of cropland and coal resources in the eastern plains of China[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2014, 86: 1-8.
- [2] 高建良, 蔡行行, 卢方超, 等. 特厚煤层分层开采下伏煤层应力分布及破坏特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(5): 19-26.
GAO Jianliang, CAI Hanghang, LU Fangchao, *et al.* Study on underlying coal seam stress distribution and failure characteristics in slicing mining of extra-thick coal seams[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(5): 19-26.
- [3] 周福宝, 刘宏, 刘应科, 等. 煤层群开采工作面瓦斯精准定量溯源原理与技术[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(5): 11-18.
ZHOU Fubao, LIU Hong, LIU Yingke, *et al.* Principle and technology of precise and quantitative gas traceability in coal seam group mining face[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(5): 11-18.
- [4] KRÜMMELBEIN J, RAAB T. Development of soil physical parameters in agricultural reclamation after brown coal mining within the first four years[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 12(5): 109-115.
- [5] SEYBOLD C A, GROSSMAN R B, SINCLAIR H R. Evaluating soil quality on reclaimed coal mine soils in Indiana. proceedings of the 2004 national meeting of the american society of mining and reclamation and the 25th west virginia surface mine drainage task force[R]. American Society of Mining and Reclamation, Lexington, KY, 2004, 1644-1663.
- [6] 张杰琼, 方凤满, 余健, 等. 淮南大通矿区复垦土壤微生物量碳氮的分布特征[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 267-270.
ZHANG Jieqiong, FANG Fengman, YU Jian, *et al.* Spatial characteristics of soil microbial biomass carbon and nitrogen in Datong Reclaimed Coal Mine Area of Huainan Region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(3): 267-270.
- [7] 毕银丽, 郭晨, 王坤. 煤矿区复垦土壤的生物改良研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(4): 52-59.
BI Yinli, GUO Chen, WANG Kun. Research progress of biological improvement of reclaimed soil in coal mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(4): 52-59.
- [8] ZHANG S, HUANG S, LI J, *et al.* Long-term manure amendments and chemical fertilizers enhanced soil organic carbon sequestration in a wheat(*Triticum aestivum* L.) -maize(*Zea mays* L.) rotation system[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97: 2575-2581.
- [9] DANIELS, LEE W, PIETRZYKOWSKI, *et al.* Estimation of car-

- bon sequestration by pine (*Pinus sylvestris* L.) ecosystems developed on reforested post-mining sites in Poland on differing mine soil substrates[J]. *Ecological engineering: The Journal of Ecotechnology*, 2014, 73: 209–218.
- [10] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005(1): 99–105.
ZHOU Li, LI Baoguo, ZHOU Guangsheng. Advances in controlling factors of soil organic carbon[J]. *Advances in Earth Science*, 2005(1): 99–105.
- [11] 张维理, KOLBE H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(2): 317–331.
ZHANG Weili, KOLBE H, ZHANG Renlian. Research progress of SOC functions and transformation mechanisms[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(2): 317–331.
- [12] AKALA V A, LAL R. Soil organic carbon pools and sequestration rates in reclaimed minesoils in Ohio[J]. *J. Environ. Qual.*, 2001, 30(6): 2098–104.
- [13] SHRESTHA R K, LAL R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation[J]. *Geoderma*, 2011, 161(3): 168–176.
- [14] ANDERSON J D, INGRAM L J, STAHL P D. Influence of reclamation management practices on microbial biomass carbon and soil organic carbon accumulation in semiarid mined lands of Wyoming[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40(2): 387–397.
- [15] GASCH C K, HUZURBAZAR S V, WICK A F, *et al.* Assessing impacts of crested wheatgrass AND native species establishment on soil characteristics in reclaimed LAND using Bayesian Posterior Predictive Distributions[J]. *Land Degrad. Dev*, 2016, 27(3): 521–531.
- [16] SANJOY K, SUBODH K M, SUBRATO C. Soil development in 2-21 years old coalmine reclaimed spoil with trees: A case study from Sonepur-Bazari opencast project, Raniganj Coalfield, India[J]. *Ecological engineering: The Journal of Ecotechnology*, 2015, 84: 311–324.
- [17] YEOMANS J C, BREMNER J M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1988, 19(13): 1467–1476.
- [18] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703–707.
- [19] SRIROOP CHAUDHURI, LOUIS M McDonald, Eugenia M Pena-Yewtukhiw, *et al.* Chemically stabilized soil organic carbon fractions in a reclaimed minesoil chronosequence: implications for soil carbon sequestration[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(4): 1689–1698.
- [20] SRIROOP Chaudhuri, EUGENIA M Pena-Yewtukhiw, LOUIS M McDonald, *et al.* Early C sequestration rate changes for reclaimed minesoils[J]. *Soil Science*, 2012, 177(7): 443–450.
- [21] ZHAO Z, SHAHROUR I, BAI Z, *et al.* Soils development in opencast coal mine spoils reclaimed for 1–13 years in the West-Northern Loess Plateau of China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 55: 40–46.
- [22] PIERRE-ANDRÉ Jacinthe, LAL R. Tillage Effects on Carbon Sequestration and Microbial Biomass in Reclaimed Farmland Soils of Southwestern Indiana[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(2): 605–613.
- [23] 王蕾, 张宇婕, 于亚军. 煤矸山复垦林、草地土壤有机碳差异及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(12): 3717–3722.
WANG Lei, ZHANG Yujie, YU Yajun. The variation of soil organic carbon and its influencing factors between reclaimed woodland and grassland in coal waste pill[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(12): 3717–3722.
- [24] WICK A F, INGRAM L J, STAHL P D. Aggregate and organic matter dynamics in reclaimed soils as indicated by stable carbon isotopes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(2): 201–209.
- [25] HU Zhenqi, QI Jiazhong, SI Jitao, *et al.* Physical and chemical properties of reclaimed soil filled with fly ash[J]. *Journal of China Coal Society*, 2002, 27(6): 639–643.
- [26] POWLSON D S, JENKINSON D S. A comparison of the organic matter, biomass, adenosine triphosphate and mineralizable nitrogen contents of ploughed and direct-drilled soils[J]. *Journal of Agricultural Science*, 1981, 97(3): 713–721.
- [27] CHILIMA J, HUANG Changyong, WU Cifang. Microbial biomass carbon trends in black and red soils under single straw application: effect of straw placement, Mineral N Addition and Tillage[J]. *Pedosphere*, 2002, 12(1): 59–72.
- [28] FAN Wenhua, BAI Zhongke, LI Hui Feng, *et al.* Effects of different vegetation restoration patterns and reclamation years on microbes in reclaimed soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 330–336.
- [29] INGRAM L J, SCHUMAN G E, STAHL P D, *et al.* Microbial respiration and organic carbon indicate nutrient cycling recovery in reclaimed soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6): 1729–1737.
- [30] 方丽娜, 杨效东, 杜杰. 土地利用方式对西双版纳热带森林土壤微生物生物量碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 837–844.
FANG Lina, YANG Xiaodong, DU Jie. Effects of land use pattern on soil microbial biomass carbon in Xishuangbanna[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4): 837–844.
- [31] ADELI A, MCLAUGHLIN M R, BROOKS J P, *et al.* Age chronosequence effects on restoration quality of reclaimed coal mine soils in mississippi agroecosystems[J]. *Soil Science*, 2013, 178(7): 335–343.
- [32] SPARLING G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter[J]. *Soil Research*, 1992, 30(2): 195–207.
- [33] POWSLON D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil: Grammas irradiation, autoclaving, air-drying and fumigation[J]. *Soil Biol Biochem*, 1976, 16(4): 459–464.
- [34] 唐玉姝, 魏朝富, 颜廷梅, 等. 土壤质量生物学指标研究进展[J]. *土壤*, 2007, 39(2): 157–163.
TANG Yushu, WEI Chaofu, YAN Tingmei, *et al.* Biological indicator of soil quality: A review[J]. *Soil*, 2007, 39(2): 157–163.
- [35] QI Y C, DONG Y S, PENG Q, *et al.* Effects of a conversion from grassland to cropland on the different soil organic carbon fractions in Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(2): 315–328.
- [36] SINGH R S. Microbial biomass acts as a source of plant nutrient in dry tropical forest and savanna[J]. *Nature*, 1989, 338: 499–500.