

中国百种杰出学术期刊  
中国精品科技期刊  
中国科协优秀期刊  
中国科学院优秀科技期刊  
新中国 60 年有影响力的期刊  
国家期刊奖

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 1 期  
Vol.31 No.1  
**2011**



中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 1 期      2011 年 1 月      (半月刊)

## 目 次

青藏高原东缘林线杜鹃-岷江冷杉原始林的空间格局 .....	缪 宁,刘世荣,史作民,等 ( 1 )
季风常绿阔叶林不同恢复阶段藤本植物的物种多样性比较 .....	李帅锋,苏建荣,刘万德,等 ( 10 )
越冬和复苏时期太湖水体蓝藻群落结构的时空变化 .....	顾婷婷,孔繁翔,谭 啸,等 ( 21 )
海南新村湾海草床主要鱼类及大型无脊椎动物的食源 .....	樊敏玲,黄小平,张大文,等 ( 31 )
广西涠洲岛造礁珊瑚种群结构的空间分布 .....	梁 文,张春华,叶祖超,等 ( 39 )
宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨根系分布特征及其与根系吸水的关系 .....	席本野,王 焯,贾黎明,等 ( 47 )
干旱河谷-山地森林交错带土壤水分与养分特征 .....	刘 彬,罗承德,张 健,等 ( 58 )
信号分子水杨酸减缓干旱胁迫对紫御谷光合和膜脂过氧化的副效应 .....	易小林,杨丙贤,宗学风,等 ( 67 )
UV-B 辐射对南方红豆杉生活史型和紫杉烷类含量的影响 .....	于景华,李德文,庞海河,等 ( 75 )
模拟氮沉降对石栎和苦槠幼苗土壤呼吸的影响 .....	李 凯,江 洪,由美娜,等 ( 82 )
环渤海湾地区连作苹果园土壤中酚酸类物质变化 .....	孙海兵,毛志泉,朱树华 ( 90 )
不同施肥方法对马来沉香和土沉香苗期根系生长的影响 .....	王 冉,李吉跃,张方秋,等 ( 98 )
秋华柳和枫杨幼苗对镉的积累和耐受性 .....	贾中民,魏 虹,孙晓灿,等 ( 107 )
祁连山北坡退化林地植被群落的自然恢复过程及土壤特征变化 .....	赵成章,石福习,董小刚,等 ( 115 )
中国北方农牧交错带 C3 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与温度的关系及其对水分利用效率的指示 .....	刘贤赵,王国安,李嘉竹,等 ( 123 )
不同退耕模式细根(草根)分解过程中 C 动态及土壤活性有机碳的变化 .....	荣 丽,李守剑,李贤伟,等 ( 137 )
黑龙江省完达山东部林区东北虎猎物生物量 .....	周绍春,张明海,孙海义 ( 145 )
生态保护项目对大熊猫栖息地的影响 .....	张玉波,王梦君,李俊清 ( 154 )
石灰和 EM 处理条件下土壤动物群落在落叶分解中的变化 .....	高梅香,张雪萍 ( 164 )
基于 EPG 的麦长管蚜、麦二叉蚜和禾谷缢管蚜取食行为比较 .....	苗 进,武予清,郁振兴,等 ( 175 )
对映-贝壳杉烷型二萜类化合物对土壤纤毛虫群落的毒性效应 .....	宁应之,杜海峰,王红军 ( 183 )
红脂大小蠹种群空间格局地统计学分析及抽样技术 .....	潘 杰,王 涛,宗世祥,等 ( 195 )
山西不同生态型大豆种质资源蛋白亚基的变异 .....	王燕平,李贵全,郭数进,等 ( 203 )
施肥和覆膜垄沟种植对旱地小麦产量及水氮利用的影响 .....	李廷亮,谢英荷,任苗苗,等 ( 212 )
近 40a 甘肃省气候生产潜力时空变化特征 .....	罗永忠,成自勇,郭小芹 ( 221 )
基于 GIS 的农村住区生态重要性空间评价及其分区管制——以兴国县长冈乡为例 .....	谢花林,李秀彬 ( 230 )
农户收入差异对生活用能及生态环境的影响——以江汉平原为例 .....	杨 振 ( 239 )
河北省耕地生态经济系统能值指标空间分布差异及其动因 .....	王 千,金晓斌,周寅康,等 ( 247 )
土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响 .....	罗友进,魏朝富,李 渝,等 ( 257 )
<b>专论与综述</b>	
景观格局-土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性 .....	刘 宇,吕一河,傅伯杰 ( 267 )
美国煤矿废弃地的生态修复 .....	张成梁,B. Larry Li ( 276 )
农田土壤食物网管理的原理与方法 .....	陈云峰,胡 诚,李双来,等 ( 286 )
<b>学术信息与动态</b>	
旱地、荒漠和荒漠化:探寻恢复之路 ——第三届国际荒漠化会议述评 .....	吕一河,傅伯杰 ( 293 )

# 土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响

罗友进<sup>1</sup>, 魏朝富<sup>1,\*</sup>, 李 渝<sup>2</sup>, 任镇江<sup>1</sup>, 廖和平<sup>1</sup>

(1. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 贵州省土壤肥料研究所, 贵阳 550006)

**摘要:**对贵州省关岭县石漠化地区不同土地利用方式下的土壤团聚体的稳定性、有机碳分布以及大团聚体有机碳矿化进行了研究,探讨了大团聚体对有机碳的保护作用,以期在选择合理的石漠化治理措施提供科学依据。选取了当地主要的4种土地利用方式,分别为水田(水旱轮作)、旱地、花椒林和火龙果林;其中花椒林和火龙果林位于石漠化治理区内。采用湿筛法分离出各级土壤团聚体并结合室内恒温培养法测定原状和破碎大团聚体中有机碳的矿化动态变化,其中大团聚体保护性碳含量为破碎与原状大团聚体有机碳在42 d内累积矿化量的差值。结果表明:土地利用方式对土壤团聚体稳定性具有显著影响。水田土壤团聚体稳定性要明显优于旱地、花椒林和火龙果林,且后3种土地利用方式间也存在显著差异。土壤有机碳也受到土地利用方式的影响,水田和旱地土壤有机碳含量要明显高于火龙果林和花椒林。各粒级团聚体有机碳含量在土地利用方式间具有较大差异,2—5 mm、0.25—2 mm和<0.25 mm团聚体中有机碳含量按水田、火龙果林、旱地和花椒林依次下降,5—8 mm团聚体中有机碳含量则以花椒林最高,其次是水田和火龙果林,旱地最低。但是就各粒径团聚体的有机碳库而言,<0.25 mm团聚体是土壤有机碳的主要载体。花椒林、旱地、火龙果和水田的大团聚体保护性碳含量分别为83.37、78.86、73.81、61.04 mg/kg,其差异表明花椒林土壤大团聚体对有机碳的保护作用最强,其次是旱地和火龙果林,水田最弱。因此,在该地区种植花椒林和火龙果林可以改善其土壤质量,其可能机理是通过增加土壤中大团聚体含量,同时增强大团聚体对有机碳的保护作用。

**关键词:**大团聚体保护性碳;土地利用方式;团聚体稳定性;有机碳

## Effects of land use on distribution and protection of organic carbon in soil aggregates in karst rocky desertification area

LUO Youjin<sup>1</sup>, WEI Chaofu<sup>1,\*</sup>, LI Yu<sup>2</sup>, REN Zhenjiang<sup>1</sup>, LIAO Heping<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Province, Guiyang 550006, China

**Abstract:** Under the global climate change, land use patterns, as one of the most important indicators that influencing the mineralization of soil organic carbon and the distribution of soil organic carbon in soil aggregates, have been increasingly focused on. However, accumulated publications presently showed that very few studies have paid a lot of attention to mineralization carbon, aggregate protected carbon, distribution of soil organic carbon in aggregates and soil aggregate stability effecting on them in karst rocky desertification area. In this paper, stability of soil aggregates, distribution of soil organic carbon and mineralization of organic carbon in macroaggregates under different land use patterns were studied. At the same time, the protection function of macroaggregates to organic carbon was discussed. The objective was to have scientific means for choosing appropriate measures to rehabilitate rocky desertification land. A research trial with four main land use patterns [paddy, dryland, Chinese prickly ash orchard and Pitaya orchard] was sampled in karst rocky desertification area, Guanling County, Guizhou province. Soil aggregates were separated by wet sieving. Mineralization of

**基金项目:**国家科技支撑计划课题(2008BAB38B02-3, 2006BAD05B01-02);西南大学生态学重点学科“211工程”经费资助

收稿日期:2010-03-27; 修订日期:2010-07-28

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weicf@swu.edu.cn

organic carbon in intact and crush macroaggregates was tested by incubation in laboratory. Aggregates protected carbon was measured using methods of wet sieving after 42-day incubations of intact and crush macroaggregates of size  $<0.25$  mm. The results showed: stability of soil aggregates and distribution of organic carbon in each size aggregate was obviously influenced by land use patterns. The mean weighted diameter of aggregates (*MWD*) was the rank with paddy soil  $>$  cropland  $>$  Chinese prickly ash orchard  $>$  Pitaya orchard. Stability of soil aggregates in paddy was greater than that in dryland, Chinese prickly ash orchard and Pitaya orchard. The content of organic carbon in paddy and dryland was higher than that in Chinese prickly ash orchard and Pitaya orchard. The distribution of organic carbon in each size aggregate was pronounced difference between land use patterns. Organic carbon content of 2—5 mm, 0.25—2 mm and  $<0.25$  mm aggregate was decreased associated with the rank of paddy, Pitaya orchard, dryland, and Chinese prickly ash orchard. But, organic carbon content of 5—8 mm aggregate was highest in Chinese prickly ash orchard and lowest in dryland. The content of macroaggregates protected carbon under Chinese prickly ash orchard, dryland, Pitaya orchard and paddy was 83.37 mg/kg, 78.86 mg/kg, 73.81 mg/kg and 61.04 mg/kg, respectively. The difference above-mentioned of macroaggregate protected carbon content suggested that the protection of macroaggregate to organic carbon was strongest in Chinese prickly ash orchard, followed by dryland and Pitaya orchard and weakest in paddy. That is, Chinese prickly ash orchard can improve the content of soil macroaggregate. Certainly, macroaggregate protected carbon concentration also was increased in Chinese prickly ash orchard than that in other land use patterns. Therefore, planting Chinese prickly ash and Pitaya can improve soil quality, due to increasing macroaggregate concentration and enhancing protection of macroaggregate to organic carbon. The policy implications of this study was that soil in karst rocky desertification area can be managed through changing land use patterns to accumulate more soil organic carbon, in order to reduce the emission of carbon from soil to atmosphere.

**Key Words:** macroaggregates protected carbon; land use patterns; stability of aggregates; soil organic carbon

全球土壤储存的有机碳量为  $1.4 \times 10^{18}$ — $1.5 \times 10^{18}$  g, 约是大气碳库 ( $0.75 \times 10^{18}$  g) 的 2 倍, 其微小的改变均会引起大气  $\text{CO}_2$  浓度的很大改变。土地利用变化是影响土壤有机碳含量和储量变化的主要人为因素之一。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 评估报告表明, 在过去 20a 中大约有 1/4 左右的人为  $\text{CO}_2$  的释放是由于土地利用变化造成<sup>[1]</sup>。Houghton 等<sup>[2]</sup> 根据中美土地利用变化并结合联合国粮农组织 (FAO) 最新的关于热带地区毁林、造林的情况, 估算了人为活动向大气中排放的  $\text{CO}_2$  通量, 结果表明, 1850—2000 年由于土地利用和土地管理变化导致 156 Pg 的碳释放到大气中。在不同的土地利用方式下, 由于有机物质输入和输出的不同, 导致土壤理化和生物学性状的差异, 影响了土壤有机碳的组成和矿化过程, 进而造成了土壤有机碳含量差异。研究表明, 不同植被类型下土壤有机碳密度差异明显, 草甸和森林最高, 灌木和农田次之, 草原较低, 荒漠最低<sup>[3]</sup>。在喀斯特石漠化区, 阔叶林土壤有机总碳含量明显高于灌木林、灌草丛和稀疏草丛<sup>[4]</sup>。张心昱等<sup>[5]</sup> 研究了北京市延怀盆地不同农业土地利用方式下土壤有机碳含量和密度, 结果表明, 其变化趋势表现为: 果园  $>$  菜地  $>$  高投入玉米地  $>$  中投入玉米地  $>$  大豆地  $>$  低投入玉米地。

土壤有机碳矿化是陆地生态系统碳循环的重要过程, 其矿化速率除了与土壤微生物数量和活性有关外, 还与有机碳本身对微生物的生物有效性有关。土壤团聚体特性是土壤有机碳生物有效性的主要限制因子<sup>[6-7]</sup>。不同粒级团聚体中土壤有机质与粘土颗粒之间在结合方式及结构等方面存在差异, 对微生物所表现出的活性也不同, 从而致使各级团聚体中有机碳矿化的存在差异。目前, 对土壤团聚体的研究主要集中在团聚体的形成规律、养分元素在团聚体中的分布特征、分配途径等方面, 并取得了许多重要研究成果<sup>[8-12]</sup>; 也有关于土壤各粒级团聚体矿化的少量研究, 如郝瑞军等<sup>[13]</sup>、张志丹等<sup>[14]</sup> 和 Nyamadzawo 等<sup>[15]</sup> 从水分状况、耕作方式对土壤各粒级团聚体矿化影响进行了研究, 但关于土地利用方式对不同粒级团聚体中有机碳的矿化规律研究仍较少, 尤其是在喀斯特石漠化区。通常认为  $>0.25$  mm 团聚体是土壤团粒结构体, 是土壤中最好的结构体, 其数量与土壤肥力状况呈正相关。因此, 本文通过田间采样结合室内培养试验, 研究了石漠化地区土地

利用方式对团聚体有机碳分布以及大团聚体有机碳矿化动态的影响,探讨大团聚体对有机碳的保护作用,以期进一步阐明土壤培肥机理以及为该区域的土壤质量提高提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区自然概况

土壤样品采自贵州省关岭布依族苗族自治县(北纬 25°34'—26°05',东经 105°15'—105°49')。该县位于贵州省中部偏西南,坐落于云贵高原东部脊状斜坡南侧向广西丘陵倾斜的斜坡地带。地势西北高、东南低,境内山脉属乌蒙山系,山体多起伏绵延;地貌具有高低起伏大,类型复杂多样的特征;境内气候呈立体状,主要以中亚热带季风湿润气候为主,四季分明,热量充足、水热同季,年平均气温为 16.2℃,年降雨量 1205—1657 mm。成土母岩主要为灰岩,其次为白云岩,土壤类型为黄色石灰土。

### 1.2 土壤样品采集与处理

样品采集于该县板贵乡,根据野外调查选取了当地 4 种主要土地利用方式,其分别为水田、旱地、花椒林和火龙果林,其中花椒林和火龙果林位于石漠化治理区内,水田为水旱轮作,旱地种植玉米。取样时间为 2009 年 10 月下旬,在每个采样区内设置 3 个重复样地,每个样点采用随机多点采样法采集 0—30 cm 土样,尽量保持原有的结构状态。带回室内,将其中 3/4 大部分沿土壤的自然结构轻轻地剥开,将原状土剥成直径 10—12 mm 左右的小土块,并挑去粗根和小石块,自然风干并过 8 mm 筛用于土壤团聚体的分级;将剩下的土样自然风干过 2 mm 和 0.25 mm 筛用于土壤基本理化性质和颗粒组成的测定,测定方法依照《土壤农化分析方法》<sup>[16]</sup>进行,结果见表 1 和 2。

表 1 不同土地利用方式土壤基本理化性质

Table 1 Soil basic properties under different land use patterns

土地利用类型 Land use patterns	pH	有机碳 /(g/kg) Organic C	全氮 /(g/kg) Total N	有效氮 /(mg/kg) Available N	全钾 /(g/kg) Total K	有效钾 /(mg/kg) Available K	全磷 /(g/kg) Total P	有效磷 /(mg/kg) Available P
花椒林 Chinese prickly ash orchard	7.1	10.62	1.12	98.27	11.71	82.80	0.54	11.57
旱地 Dry land	6.8	11.61	1.19	102.31	11.83	84.98	0.68	15.34
火龙果林 Pitaya orchard	7.1	10.77	1.26	112.18	12.98	92.73	0.62	14.30
水田 Paddy	7.0	13.33	1.22	109.47	12.63	98.28	0.72	18.44

表 2 不同土地利用方式土壤颗粒组成

Table 2 Soil particle composition under different land use patterns

土地利用类型 Land use patterns	砂粒 Sand/% (0.02—2 mm)	粉粒 Silt/% (0.002—0.02 mm)	粘粒 Clay/% ( <0.002 mm)
花椒林 Chinese prickly ash orchard	46.95	26.68	26.37
旱地 Dry land	46.10	30.15	23.74
火龙果林 Pitaya orchard	54.74	25.24	20.02
水田 Paddy	50.49	26.32	23.19

取过 8 mm 筛的土壤样品 500 g 以上放在筛组顶层(5、2、0.25 mm)进行干筛,分离出风干团聚体(5—8、2—5、0.25—2、<0.25 mm),称重,保存备用。将干筛得到的各级团聚体按其质量百分比配成质量为 50 g 的土样进行湿筛。首先,将 50 g 在水中浸泡 5 min,然后将土样依次通过 5、2、0.25 mm 的筛子,上下均匀震荡 2 min 后,残留在不同筛子上的土壤即为不同粒级的土壤团聚体。本文采用平均重要直径(mean weight diameter, MWD)表示团聚体尺寸分布:  $MWD = \sum_{i=1}^4 X_i W_i$ ,其中  $X_i$  表示各粒级的平均直径,  $W_i$  表示留在筛子上土壤质量占全部样品质量的比例。重复以上操作直到 >0.25 mm 团聚体土壤足够于土壤有机碳矿化培养试

验和有机碳测定。

采用室内恒温培养、碱液吸收法测定土壤有机碳的矿化量。取部分分离所得的风干大团聚体(>0.25 mm)进行研磨过0.25 mm,以破坏其团粒结构。将风干的原状团聚体和破碎团聚体加入适量蒸馏水后混匀,在(28±1)℃的恒温培养箱内预培养2周以恢复土壤微生物活性。然后,分别称取相当于风干土25 g土样各3份,置于1000 mL培养瓶中,调节水分达到田间持水量的60%。将盛有25 mL 0.01 mol/L的NaOH溶液的50 mL吸收瓶小心置于培养瓶内,将培养瓶加盖密封,在25℃的恒温培养箱内培养。于培养后的第1、3、5、8、11、15、21、30、42天取出吸收瓶,将其中的溶液完全洗入三角瓶中,加入1 mol/L BaCl<sub>2</sub>溶液2 mL及2滴酚酞指示剂,用标准酸(HCl)滴定至微红色,根据CO<sub>2</sub>的释放量计算出培养期内的土壤有机碳的矿化量<sup>[16]</sup>。其中大团聚体保护性碳含量为破碎团聚体与原状团聚体的有机碳矿化量差值<sup>[15]</sup>。

团聚体SOC的矿化采用一级反应方程模拟<sup>[14]</sup>:

$$C_t = C_0(1 - e^{-kt}) + C_1$$

式中, $C_t$ (mg C/kg)为时间 $t$ (d)中累积矿化的碳, $C_0$ (mg C/kg)为潜在矿化碳库, $k$ (mg CO<sub>2</sub>-C·kg<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>)表示对应的矿化系数, $C_1$ (mg C/kg)是快速矿化碳库。该模型采取非线性回归的方式对碳矿化进行拟合。 $C_0$ 和 $k$ 采用Marquardt方法进行反复迭代优化。半衰期 $t_{1/2}$ (d)的计算方法为: $t_{1/2} = \ln 2/k$ 。初始潜在矿化率( $C_0k$ ), $t_{1/2}$ 以及 $C_0$ 用来描述矿化过程。

### 1.3 数据统计分析

相关指标的差异显著性检验和方程拟合采用SPSS16.0软件,制图采用Excel 2003。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用方式下土壤团聚体分布

从表3可以看出,不同土地利用方式下各粒级土壤团聚体组成有所差异。花椒林和火龙果林中<0.25 mm团聚体所占比例最大,显著高于其它粒径团聚体,分别达到39.59%和59.48%;旱地则以0.25—2 mm和<0.25 mm团聚体为主;水田中5—8 mm团聚体所占比例最高,但只达29.58%,与2—5 mm和<0.25 mm团聚体不存在显著差异。同一粒径团聚体在各土地利用方式间也具有差异,其中5—8 mm团聚体含量以水田最高,花椒林最低;2—5 mm团聚体含量以花椒林最高,火龙果林最低;0.25—2 mm团聚体含量以旱地最高,火龙果林最低;<0.25 mm团聚体含量以火龙果林最高,水田最低。有学者将>0.25 mm团聚体称为土壤团粒结构体,认为是土壤中最好的结构体,是维持土壤结构稳定的基础,其含量越高,土壤结构的稳定性越大<sup>[17]</sup>。从表1可以看出,>0.25 mm团聚体所占的比例以水田最高,其次是旱地和花椒林,火龙果林最低。Van于1949年提出将平均重量直径(MWD)作为土壤团聚体分布及稳定性的指标,并认为土壤团聚体平均重量直径越大,土壤团聚体越稳定。从表3可得,平均重量直径分别为水田(3.01)>旱地(1.89)>花椒林(1.65)>火龙果林(1.30)。因此,经石漠化治理后,花椒林和火龙果林土壤结构稳定性已趋近于当地旱地,但不及水田。

表3 不同土地利用方式下土壤团聚体分布特征

Table 3 Distribution of soil aggregates under different land use patterns

土地利用类型 Land use patterns	团聚体各粒级组成含量 Distribution of soil aggregates/%				平均重量直径 MWD/mm
	5—8 mm	2—5 mm	0.25—2 mm	<0.25 mm	
花椒林 Chinese prickly ash orchard	4.47 ± 0.51dD	30.40 ± 0.43bA	25.54 ± 0.40cB	39.59 ± 0.54aB	1.65 ± 0.028C
旱地 Dry land	12.08 ± 0.37dB	20.16 ± 0.90cC	35.73 ± 0.35aA	32.03 ± 1.07bC	1.89 ± 0.047B
火龙果林 Pitaya orchard	10.89 ± 0.71cC	8.83 ± 0.49dD	20.80 ± 0.75bC	59.48 ± 1.27aA	1.30 ± 0.057D
水田 Paddy	29.58 ± 0.93aA	26.19 ± 0.88abB	17.98 ± 0.57bD	26.25 ± 0.62abD	3.01 ± 0.039A

不同小写字母表示团聚体粒级之间差异达显著水平( $P < 0.05$ , LSD),不同大写字母表示土地利用方式之间差异达显著水平( $P < 0.05$ , LSD)

## 2.2 不同土地利用方式下各团聚体中有机碳含量

从图 1 可以看出,全土有机碳含量在各土地利用方式间存在显著差异,水田、旱地要明显高于花椒林和火龙果林;花椒林与火龙果林间不存在显著差异。各粒径团聚体中有机碳含量存在着差异,除火龙果林以 0.25—2 mm 团聚体中有机碳含量最高外,在其它 3 种土地利用方式中均以 <0.25 mm 团聚体中有机碳含量最高。不同粒径团聚体中有机碳含量在各土地利用方式间存在差异。其中,2—5 mm 和 0.25—2 mm 团聚体中有机碳含量以水田、火龙果林、旱地与花椒林依次下降,且水田要明显高于旱地和花椒林;5—8 mm 团聚体中有机碳含量以花椒林最高,其次是水田和火龙果林,旱地最低,且各土地利用方式间均存在着显著差异;<0.25 mm 团聚体中有机碳含量以水田、花椒林、旱地、火龙果林依次减少,其中花椒林与旱地间不存在显著差异。同时,通过对 >0.25 mm 各级团聚体有机碳含量的加权处理计算出 >0.25 mm 团聚体有机碳含量以水田最高(12.17 g/kg),其次是火龙果林(11.89 g/kg)和旱地(10.63 g/kg),花椒林最低(8.83 g/kg)。结合图 1 和表 3 计算出不同土地利用下各粒级团聚体有机碳库量,2—5 mm 和 5—8 mm 团聚体有机碳库量以水田最大,0.25—2 mm 团聚体有机碳库量以旱地最大,<0.25 mm 团聚体有机碳库量则以火龙果林最大。但不论哪种土地利用方式,<0.25 mm 粒级团聚体都是土壤有机碳的主要载体。

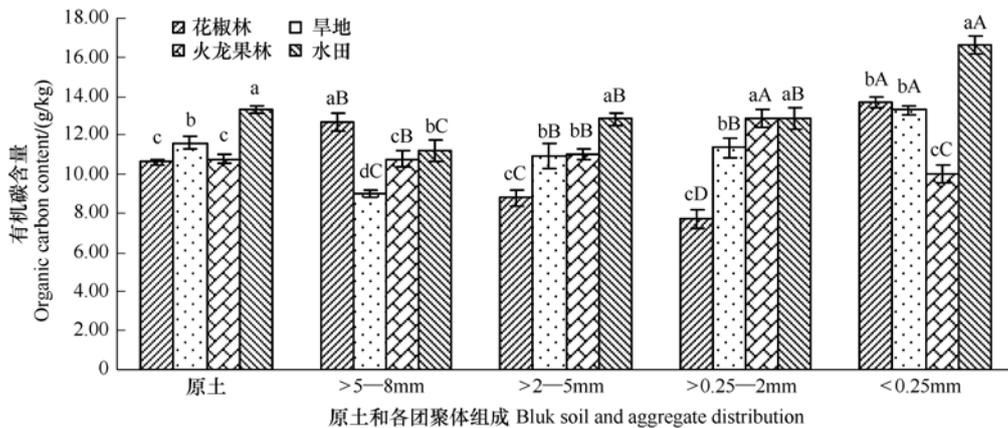


图 1 不同土地利用方式下各粒级团聚体有机碳含量

Fig. 1 Organic carbon content in each sizes aggregates under different land use patterns

注:不同小写字母表示各级团聚体或原土指标之间差异达到显著水平( $P < 0.05$ , LSD),不同大写字母表示同一土地利用方式下各级团聚体中指标之间差异达到显著水平( $P < 0.05$ , LSD)

## 2.3 不同土地利用方式下大团聚体矿化及拟合

从图 2 可以看出,水田与花椒林原状大团聚体有机碳累积矿化量要明显大于火龙果林和旱地。在培养时间为 42 d 时,花椒林、旱地和火龙果林土壤有机碳累积矿化量分别是水田的 93.85%、67.58% 和 79.17%。不同土地利用方式下原状大团聚体有机碳累积矿化量变化趋势较一致,在培养前期有机碳矿化速度较快,随着培养时间的延迟矿化速度下降,在第 11 天有小幅增加,随后又逐渐减缓慢。本文采用改进型一级动力模型对原状大团聚体有机碳矿化情况进行了拟合,拟合效果较好(相关系数  $R^2$  为 0.98—0.99),相关模型拟合结果见表 4。从该表可看出,在这 4 种土地利用方式中,快速矿化碳库( $C_1$ )不存在着显著差异,花椒林略高于其它 3 种土地利用方式;潜在矿化碳库( $C_0$ )存在着显著差异,

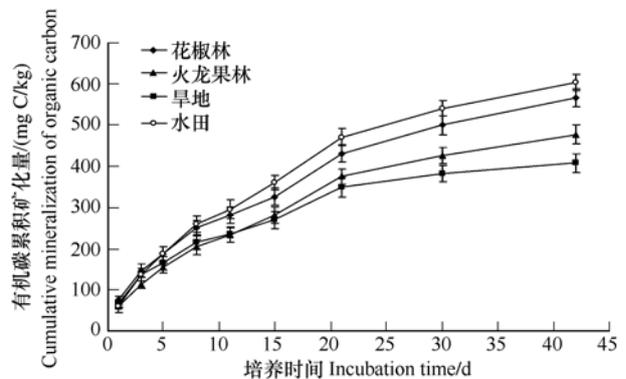


图 2 不同土地利用方式下原状大团聚体 (>0.25 mm) 有机碳累积矿化量的变化

Fig. 2 Mineralization of organic carbon in intact macroaggregate (>0.25 mm) under different land use patterns

花椒林、火龙果林和水田分别是旱地的 1.59、1.36、1.71 倍。初始潜在矿化率 ( $C_0k$ ) 在不同土地利用方式间具有差异,水田要明显高于其它 3 种土地利用方式。半衰期 ( $t_{1/2}$ ) 在这 4 种土地利用方式中以旱地最小,花椒林最大,花椒林、火龙果林和水田间不存在显著性差异。

表 4 不同土地利用方式下原大团聚体 ( $>0.25$  mm) 矿化拟合模型 ( $C_t = C_0(1 - e^{-kt}) + C_1$ ) 的参数、相关系数 ( $R^2$ )、 $C_0k$  及半衰期 ( $t_{1/2}$ )

Table 4 Parameter,  $R^2$ ,  $C_0k$  and  $t_{1/2}$  in model of organic carbon mineralization for intact macroaggregate ( $>0.25$  mm) under different land use patterns

模型参数 Model parameters	花椒林 Chinese prickly ash orchard	旱地 Dry land	火龙果林 Pitaya orchard	水田 Paddy
$C_0$ /(mg C/kg)	604.85b	379.09d	515.82c	648.55a
$k$ /(mg CO <sub>2</sub> -C·kg <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	0.04b	0.06a	0.05b	0.05b
$C_1$ /(mg C/kg)	66.28a	58.32a	43.06a	40.25a
$C_0 + C_1$ /(mg C/kg)	671.13a	437.41c	558.88b	688.80a
$R^2$	0.99	0.98	0.99	0.99
$C_0k$ /(mg CO <sub>2</sub> -C·kg <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	25.34b	23.65b	23.30b	31.72a
$t_{1/2}$ /d	16.57a	11.19b	15.53a	14.21a

不同字母表示土地利用方式之间指标差异达到显著 ( $P < 0.05$ , LSD)

图 3 和表 5 分别为破碎大团聚体有机碳累积矿化量变化情况和模型拟合结果。在培养结束时 (42 d), 花椒林、旱地、火龙果林和水田破碎大团聚体有机碳累积矿化量分别为 649.92、486.87、551.76、664.74 mg C/kg, 花椒林和水田破碎团聚体有机碳累积矿化量要大于火龙果林和旱地。不同土地利用方式下破碎大团聚体有机碳累积矿化量变化趋势较一致,在培养前期有机碳矿化速度较快,随着培养时间的延迟矿化速度下降,在第 15 天有小幅增加,随后又逐渐减慢。在这 4 种土地利用方式中,快速矿化碳库 ( $C_1$ ) 不存在着显著差异,水田略高于其它 3 种土地利用方式;潜在矿化碳库 ( $C_0$ ) 存在着显著差异,花椒林、火龙果林和水田分别是旱地的 1.49、1.26、1.62 倍。初始潜在矿化率 ( $C_0k$ ) 在不同土地利用方式间不存在显著差异,水田和花椒林略高。半衰期 ( $t_{1/2}$ ) 在这 4 种土地利用方式中以旱地最小,水田最大,花椒林、火龙果林和水田间不存在显著性差异。

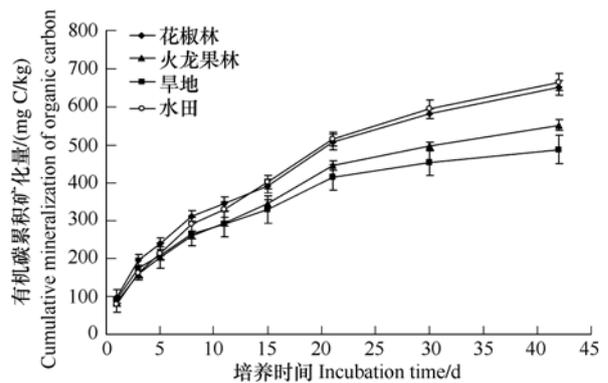


图 3 不同土地利用方式下破碎团聚体 ( $>0.25$  mm) 有机碳累积矿化量的变化

Fig. 3 Mineralization of organic carbon in crush macroaggregate ( $>0.25$  mm) under different land use patterns

表 5 不同土地利用方式下破碎团聚体 ( $>0.25$  mm) 矿化拟合模型 ( $C_t = C_0(1 - e^{-kt}) + C_1$ ) 的参数、相关系数 ( $R^2$ )、 $C_0k$  及半衰期 ( $t_{1/2}$ )

Table 5 Parameter,  $R^2$ ,  $C_0k$  and  $t_{1/2}$  in model of organic carbon mineralization for crush macroaggregate ( $>0.25$  mm) under different land use patterns

模型参数 Model parameters	花椒林 Chinese prickly ash orchard	旱地 Dry land	火龙果林 Pitaya orchard	水田 Paddy
$C_0$ /(mg C/kg)	645.99b	434.68d	548.11c	705.93a
$k$ /(mg CO <sub>2</sub> -C·kg <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	0.05b	0.06a	0.05b	0.05b
$C_1$ /(mg C/kg)	21.34a	13.87a	19.51a	21.69a
$C_0 + C_1$ /(mg C/kg)	737.88a	434.68b	548.11b	705.93a
$R^2$	0.98	0.98	0.99	0.99
$C_0k$ /(g CO <sub>2</sub> -C·kg <sup>-1</sup> ·C·d <sup>-1</sup> )	30.32a	27.82a	27.70a	33.11a
$t_{1/2}$ /d	14.76b	10.93a	13.73b	14.80a

不同字母表示土地利用方式之间指标差异达到显著 ( $P < 0.05$ , LSD)

## 2.4 不同土地利用方式下大团聚体保护性碳以及大团聚体矿化释放 CO<sub>2</sub>-C 分配比

土地利用方式对大团聚体保护性碳含量具有影响(图4)。花椒林、旱地、火龙果林和水田大团聚体保护性碳含量分别为 83.37、78.86、73.81 和 61.04 mg/kg。花椒林土壤中大团聚体对有机碳的保护作用要强于其它土地利用方式,而水田中大团聚体对有机碳的保护作用则相对较弱。其表明种植花椒和火龙果林治理石漠化过程的可能机理是通过增加土壤大团聚体数量,同时增强大团聚体对有机碳保护作用。

土壤有机碳矿化释放 CO<sub>2</sub>-C 分配比是指,在一定时间内,土壤有机碳矿化释放的 CO<sub>2</sub>-C 含量占土壤有机碳含量的比例<sup>[18]</sup>。基于此,文中大团聚体有机碳矿化释放 CO<sub>2</sub>-C 分配比以培养 42 d 大团聚体有机碳累积矿化量占大团聚体中有机碳含量计算所得。其计算结果见图 5。原状大团聚体有机碳矿化释放 CO<sub>2</sub>-C 分配比以花椒林最大(6.6%),其次是水田和火龙果林(分别为 5.0% 和 4.0%),旱地最小(3.8%)。破碎大团聚体有机碳矿化释放 CO<sub>2</sub>-C 分配比在这 4 种土地利用方式间的差异与原状大团聚体相似,只是破碎大团聚体该比值都要大于原状大团聚体。

## 3 讨论

### 3.1 土地利用方式对团聚体分布及有机碳含量的影响

近年来研究表明,同母质发育的土壤因利用方式不同,团聚体的组成和数量都可发生很大变化,利用方式对团聚体的形成具有较大的影响。本研究结果也符合了一观点。研究区内 4 种土地利用方式间各粒级团聚体的所占比例都存在的显著性差异。毛艳玲等<sup>[19]</sup>研究指出,当林地开垦为农田后,>2 mm 团聚体数量明显下降,<0.25 mm 团聚体含量显著上升,团聚体稳定性下降。赵世伟等<sup>[20]</sup>通过对黄土高原子午岭植被恢复区调查后指出,由农田向弃耕地、草地、灌丛、林地等变化时,土壤团聚体稳定性逐渐增加。本研究结果中,花椒林和火龙果林土壤团聚体稳定性不如水田,但已与旱地相差不大,即表明种植花椒和火龙果可以抑制当地的石漠化进程,有助于土壤稳定性的提升。这是由于种植花椒和火龙果减少了对土壤的人为干扰,降低了人为耕作对土壤团聚体的破坏;增加了作物残茬或枯枝落叶残留量以及肥料(尤其是有机肥)的投入量;同时,在石漠化地区种植花椒和火龙果提高了植被覆盖率,改善了土壤微环境,缓减了当地特殊气候如干旱等对土壤结构的破坏。

不同土地利用方式由于有机物料的输出和输入不同,导致了其土壤物理性状和微生物活性差异,从而对土壤有机碳在各粒级团聚体分布产生影响。植被恢复可增加土壤各粒级团聚体有机碳含量,其中对 <0.25 mm 团聚体中有机碳的影响最大,其次是 >5 mm 团聚体<sup>[20]</sup>。本研究中,花椒林土壤各粒级团聚体有机碳的分布与之相似。同时,这也符合有机碳输入优先向小粒级团聚体积累的层级理论<sup>[21]</sup>。但是,在本研究中,火龙果林则以 0.25—2 mm 团聚体中的有机碳含量最高且显著高于其它各粒级团聚体。农业管理措施的差异会对土壤输入有机碳在各粒级团聚体中的分配产生影响。Razafimbelo 等<sup>[22]</sup>则研究发现在常规耕作土壤中 0.2—2 mm 团聚体中有机碳含量低于 0.02—0.2 mm 和 0.002—0.02 mm 团聚体中有机碳含量,在免耕结合

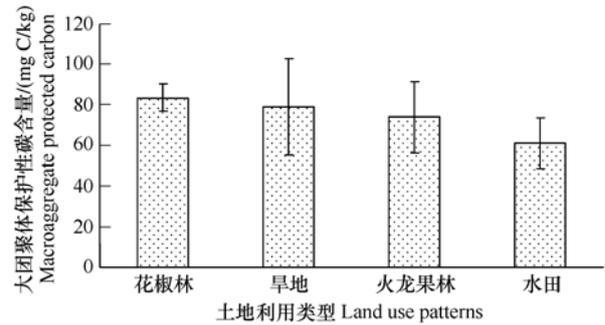


图 4 不同土地利用方式下大团聚体保护性碳含量

Fig. 4 Macroaggregate protected organic carbon content under different land use patterns

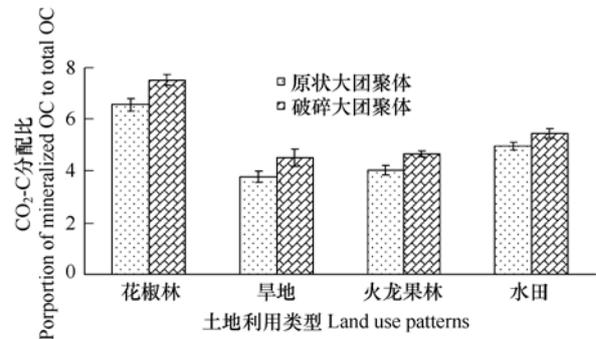


图 5 不同土地利用方式下原状和破碎大团聚体有机碳释放 CO<sub>2</sub>-C 占大团聚体有机碳分配比

Fig. 5 Proportion of cumulative mineralized organic carbon expressed as organic carbon in macroaggregate under different land use patterns

秸秆覆盖土壤中 0.2—2 mm 团聚体中有机碳含量与 0.02—0.2 mm 和 0.002—0.02 mm 团聚体中有机碳含量相当。同时,土壤中铁铝氧化物的含量也会对土壤团聚体有机碳的分配产生。土壤有机碳和铁铝氧化物作为土壤团聚体形成的两种主要胶结物质。一般认为在土壤有机碳含量较高、粘粒和氧化铁铝含量较低的土壤中,有机碳的作用占主导地位;而在有机质含量不高、粘粒和氧化铁铝含量较高的土壤中,团聚体的形成则主要依靠粘粒的内聚力和铁铝氧化物的胶结作用<sup>[23]</sup>。唐益群等<sup>[11]</sup>认为贵州石漠化地区棕黄色粘土团聚体的胶结主要依赖于后者;Zotarelli 等<sup>[24]</sup>研究结果也验证了铁氧化物在热带氧化土团聚体形成中的胶结作用。

### 3.2 土地利用方式对大团聚体有机碳矿化的影响

土地利用方式改变后,土壤有机碳矿化发生显著变化,其影响因素相当复杂。这些因素既包括生物因素的改变,如参与有机碳矿化过程的土壤动物和土壤微生物区系和种类组成的改变<sup>[25]</sup>,土地利用用途和植被类型改变后凋落物性质的改变<sup>[26]</sup>;也包括非生物因素的间接影响,如土壤温度、土壤湿度、土壤组分等物理和化学性质的改变等。吴建国等<sup>[27]</sup>的研究表明,六盘山区农田土壤碳矿化释放的  $\text{CO}_2\text{-C}$  量比灌木林、山杨林和辽东栎林分别低 69%、62% 和 63%,比天然次生林平均低 65%。常绿阔叶林矿化速率高于针叶林、竹林、茶园和裸地<sup>[18]</sup>。干湿交替现象会增加土壤有机碳的矿化<sup>[28]</sup>,但也有研究得到相反的结果<sup>[29]</sup>,其影响途径可能是改变土壤微生物活性或影响土壤团聚形成过程。同时,Christensen<sup>[30]</sup>指出土壤有机碳矿化与团聚体关系密切,影响土壤团聚体的因素都将影响土壤有机碳矿化,特别是团聚体粒径的改变将影响土壤有机碳的矿化速率。Goh<sup>[31]</sup>研究表明耕作土壤中稳定的大团聚体比微团聚体固存更多的碳。稳定性大团聚体比例越高,越能防止 SOC 分解矿化。也有研究表明,大团聚体比微团聚体更易矿化。郝瑞军等<sup>[13]</sup>对水稻土各粒径团聚体有机碳矿化研究表明,1—2 mm 团聚体有机碳矿化速率最高,<0.053 mm 团聚体最低。张志丹等<sup>[14]</sup>研究表明与翻耕相比,免耕使得 1—2 mm 和 0.25—0.5 mm 团聚体有机碳矿化量增加。本研究结果表明,在这 4 种土地利用方式中水田大团聚体中有机碳累积矿化量最大,其次是花椒林、火龙果林,旱地最小。这就表明水田、花椒林和火龙果林土壤中有有机碳较早地活跃。这可能与凋落物的性质不同相关。史学军等<sup>[26]</sup>研究表明含不同凋落物土壤的矿化速率有所差异,含狗牙根凋落物土壤的矿化速率和矿化量(180 d)要大于含马尾松、麻栎和青冈栎凋落物土壤。同时,施肥制度以及耕作方式等农业管理措施也是影响大团聚体有机碳矿化的重要因素。合理的施肥和耕作改善土壤结构以及微环境,提高土壤中养分的有效性和土壤生物活性。对比分析培养 42d 时原状大团聚体和破碎大团聚体有机碳累积矿化量,发现两者的差值以花椒林最大、其次是旱地和火龙果林,水田最低。其结果表明花椒林大团聚体对有机碳的保护作用最强,而水田相对较弱;也表明种植花椒林有助于改善土壤质量且效果优于火龙果。破碎大团聚体释放  $\text{CO}_2\text{-C}$  分配比要大于原状大团聚体,表明大团聚体所保护的有机碳可能源于为微生物和大团聚体所包裹的微生物降解产物<sup>[32]</sup>。同时也有研究表明土壤物理保护性碳含量的差异与团聚体内颗粒有机质(>50  $\mu\text{m}$ )以及有机质与粉粒和粘粒结合量相关,而团聚体内颗粒有机质(>50  $\mu\text{m}$ )为土壤粘粒包裹的植物残体有机物<sup>[22]</sup>。同时,土壤原状大团聚体矿化释放  $\text{CO}_2\text{-C}$  分配比以花椒林最大,水田和火龙果林次之,旱地最小,即说明花椒林和火龙果林土壤固碳能力仍弱于旱地。同时,其也表明在治理石漠化进程中,种植花椒和火龙果由于其生长前期对养分的需求较大,不能在短时间内提高土壤质量。这与李品荣等<sup>[33]</sup>对滇东南石漠化治理区地力调查结果相符。

$C_0k$  是量化有机碳矿化程度的有效参数。与单独的  $C_0$  和  $k$  相比, $C_0k$  能更好的反映不同耕作方式间团聚体有机碳矿化的差异<sup>[14]</sup>。本研究结果中,原状团聚体的  $C_0 + C_1$  在 4 种土地利用方式存在差异,其中水田和花椒林要显著大于旱地、火龙果林; $C_0k$  以水田最大,其次是花椒林、旱地,火龙果林最小,但是只有水田与其它 3 种土地利用方式间存在显著差异;半衰期( $t_{1/2}$ )在花椒林和火龙果林中要显著大于旱地,但与水田不存在显著性差异。这些都说明,在石漠化地区,种植花椒和火龙果都改善当地土壤质量,其土壤肥力可以达到接近当地现有旱地的水平。

## 4 结论

不同土地利用方式对土壤团聚体的稳定性、有机碳的分布以及大团聚体有机碳的稳定性呈现出较大差

异。在该地域水田土壤中团聚体的稳定性要明显优于其它 3 种土地利用方式;花椒林、火龙果林和旱地之间则较接近。土壤有机碳含量以水田和旱地明显高于火龙果林、花椒林。而各团聚体有机碳在不同土地利用方式差异较大,但  $>0.25$  mm 大团聚体有机碳含量在土地利用方式间的变化规律与其全土有机碳变化规律一致。各土地利用方式间原状大团聚体有机碳矿化量差异表明水田、花椒林和火龙果林土壤都比旱地土壤含有更多的活性有机碳。大团聚体保护性碳含量在土地利用方式间差异表明花椒林和火龙果林土壤中大团聚对有机碳的保护作用要优于旱地,同时也表明水田与其它 3 种土地利用方式在固碳机制上可能存在着差异,其大团聚体有机碳的保护作用较弱,而微团聚体的保护作用可能相对较强。总之,在该地区种植花椒林和火龙果林可以改善其土壤质量,其可能机理是通过增加土壤中大团聚体含量,同时提高大团聚体对有机碳的保护作用。

#### References:

- [ 1 ] IPCC. Contribution of working group I to the third assessment report of IPCC//Houghton J T, Ding Y, Nogua M, et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [ 2 ] Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850—2000. Tellus Series B Chemical and Physical Meteorology, 2003, 55: 378-390
- [ 3 ] Xie X L, Sun B, Zhou H Z, Li Z P. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(5): 687-699.
- [ 4 ] Luo H B, Liu F, Liu Y S, He T B, Su Y G. Variation of forest soil organic in karst rocky desertification area. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(9): 24-28.
- [ 5 ] Zhang X Y, Chen L D, Fu B J, Li Q, Qi J, Ma Y. Soil organic carbon changes as influenced by different agricultural land use types and management practices: A case study in Yanqing Basin, Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3198-3204.
- [ 6 ] Xu J B, Li C L, He Y Q, Wang Y L, Liu X L. Effect of fertilization on organic carbon content and fractionation of aggregates in upland red soil. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(4): 675-682.
- [ 7 ] Richard T C, Six J, Paustain K. Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States. II. Changes in soil carbon fractions along a forest to pasture chronosequence. Biology and Fertility of Soils, 2004, 40: 194-200.
- [ 8 ] Tan W F, Zhu Z F, Liu F, Hu R G, Shan S J. Organic carbon distribution and storage of soil aggregates under land use change in Jiangnan Plain, Hubei province. Journal of Natural Resources, 2006, 21(6): 973-980.
- [ 9 ] Liu X L, He Y Q, Li C L, Jiang C L, Chen P B. Distribution of soil water-stable aggregates and soil organic C, N and P in upland red soil. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(2): 255-262.
- [ 10 ] Tang X H, Wei C F, Lu J K, Luo Y J, Xie D T, Pan G X, Zeng X B. Effects of conservation tillage on aggregate stability of paddy soil in hilly region. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 49-54.
- [ 11 ] Tang Y Q, Zhang X H, She T Y, Yang P, Wang J X. Wet sieving for stability of brown clayey clay in karst rocky desertification area in pudong county, Guizhou province. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(6): 817-822.
- [ 12 ] Hua J, Zhao S W, Zhang Y, Ma S. Distribution characteristics of labile organic carbon in soil aggregates in different stages of vegetation restoration of grassland in Yunwu mountain. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4613-4619.
- [ 13 ] Hao R J, Li Z P, Che Y P, Fang H L. Organic carbon mineralization in various size aggregates of paddy soil under aerobic and submerged conditions. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9): 1944-1950.
- [ 14 ] Zhang Z D, Yang X M, Drury C F, Zhao L P. Effects of tillage practices on soil organic carbon distribution and mineralization in aggregates of a Brookston clay loam soil. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(3): 129-134.
- [ 15 ] Nyamadzawo G, Nyamangare J, Nyamugafata P, Muzulu A. Soil microbial biomass and mineralization of aggregates protected carbon in fallow-maize systems under conventional and no-tillage in central Zimbabwe. Soil & Tillage Research, 2009, 102: 151-157.
- [ 16 ] Lu R K. Analytical Methods for Soil and Agricultural Chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [ 17 ] Ding W F, Ding D S. The fractal features of soil granule structure before and after vegetation destruction on loss Plateau. Geographical Research, 2002, 21(6): 700-706.
- [ 18 ] Dai H, Wang X H, Yan E R. Effects of land use type on soil organic carbon mineralization in Tiantong, Zhejiang province. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(7): 1021-1026.
- [ 19 ] Mao Y L, Yang Y S, Xing S H, Chen G S, Cui J C. Effects of land use on soil organic carbon in water-stable aggregates. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4): 132-137.
- [ 20 ] Zhao S W, Su J, Wu J S, Yang Y H, Liu N N. Changes of soil aggregate organic carbon during process of vegetation restoration in Ziwuling. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(3): 114-117.
- [ 21 ] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt Particles. Plant and Soil, 1997, 191: 77-87.

- [22] Razafimbelo T M, Albrecht A, Oliver R, Chevallier T, Lydie Chapuis-Lardy, Feller C. Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayey soil under Malagasy conventional and no-tillage systems. *Soil & Tillage Research*, 2008, 98: 140-149.
- [23] Zhang M K, He Z L. Effect of parent materials on formation of soil aggregates. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1997, 6 (3): 198-202.
- [24] Zotarelli L, Alves B J R, Urquiaga S, Torres E, dos Santos H P, Paustian K, Boddey R M, Six J. Impact of tillage and crop rotation on aggregate-associated carbon in two Oxisols. *Soil Science Society of American Journal*, 2005, 69: 482-491.
- [25] Alvarez C R. Soil organic matter pools and their associations with carbon mineralization kinetics. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 184-189.
- [26] Shi X J, Pan J J, Chen J Y, Yang Z Q, Zhang L M, Sun B, Li Z P. Effects of different types of litters on soil organic carbon mineralization. *Environmental Science*, 2009, 30(6): 1832-1837.
- [27] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. The mineralization of soil organic carbon under different land use in the Liupan mountain forest zone. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(4): 530-538.
- [28] Deneff K, Six J, Paustian K, Merckx R. Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: short term effects of physical disturbance induced by dry wet cycles. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33: 2145-2153.
- [29] Mikha M M, Rice C W, Millikenc G A. Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37: 339-347.
- [30] Christensen B T. Carbon in primary and secondary organomineral complexes//Carter M R, Stewart A B, eds. *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc. 1996: 97-165.
- [31] Goh K M. Carbon sequestration and stabilization in soils; implications for soil productivity and climate change. *Soil Science Plant Nutrition*, 2004, 50(4): 467-476.
- [32] Franzluebbers A J, Arshad A M. Soil microbial biomass and mineralization of carbon of water stable aggregates. *Soil Science Society of American Journal*, 1997, 61, 1090-1097.
- [33] Li P R, Meng G T, Fang X J. Study on Land capacity and soil erosion on different vegetation recover patterns in rock desertification mountains of southeastern Yunnan. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(6): 35-39.

#### 参考文献:

- [3] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子. *土壤学报*, 2004, 41(5): 687-699.
- [4] 罗海波, 刘方, 刘元生, 何腾兵, 苏英格. 喀斯特石漠化地区不同植被群落的土壤有机碳变化. *林业科学*, 2009, 45(9): 24-28.
- [5] 张心昱, 陈利顶, 傅伯杰, 李琪, 齐鑫, 马岩. 不同农业土地利用方式和管理对土壤有机碳的影响——以北京市延庆盆地为例. *生态学报*, 2006, 26(10): 3198-3204.
- [6] 徐江兵, 李成亮, 何园球, 王艳玲, 刘晓利. 不同施肥处理对旱地红壤中有机碳含量及其组分的影响. *土壤学报*, 2007, 44(4): 675-682.
- [8] 谭文峰, 朱志锋, 刘凡, 胡荣桂, 单世杰. 江汉平原不同土地利用方式下土壤团聚体中有机碳的分布与积累特点. *自然资源学报*, 2006, 21(6): 973-980.
- [9] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 姜灿烂, 陈平帮. 不同土地利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征. *土壤学报*, 2009, 46(2): 255-262.
- [10] 唐晓红, 魏朝富, 吕家格, 罗友进, 谢德体, 潘根兴, 曾希柏. 保护性耕作对丘陵区水稻土团聚体稳性的影响. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 49-54.
- [11] 唐益群, 张晓辉, 余恬钰, 杨坪, 王建秀. 贵州石漠化地区棕黄色粘土团聚体稳性研究. *工程地质学报*, 2009, 17(6): 817-822.
- [12] 华娟, 赵世伟, 张扬, 马帅. 云雾山草原区不同植被恢复阶段土壤团聚体活性有机碳分布特征. *生态学报*, 2009, 29(9): 4613-4619.
- [13] 郝瑞军, 李忠佩, 车玉萍, 方海兰. 好气与淹水条件下水稻土各级团聚体有机碳矿化量. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 1944-1950.
- [14] 张志丹, 杨学明, Drury C F, 赵兰坡. 耕作方式对 Brookston 粘壤土团聚体中有机碳分布及矿化的影响. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 129-134.
- [16] 鲁如坤主编. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [17] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征. *地理研究*, 2002, 21(6): 700-706.
- [18] 戴慧, 王希华, 阎恩荣. 浙江天童土地利用方式对土壤有机碳矿化的影响. *生态学杂志*, 2007, 26(7): 1021-1026.
- [19] 毛艳玲, 杨玉盛, 邢世和, 陈光水, 崔纪超. 土地利用方式对土壤水稳性团聚体有机碳的影响. *水土保持学报*, 2008, 22(4): 132-137.
- [20] 赵世伟, 苏静, 吴金水, 杨永辉, 刘娜娜. 子午岭植被恢复过程中土壤团聚体有机碳含量的变化. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 114-117.
- [23] 章明奎, 何振立. 成土母岩对土壤团聚体形成的影响. *热带亚热带土壤科学*, 1997, 6(3): 198-202.
- [26] 史学军, 潘建君, 陈锦盈, 杨志强, 张黎明, 孙波, 李忠佩. 不同类型凋落物对土壤有机碳矿化的影响. *环境科学*, 2009, 30(6): 1832-1837.
- [27] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式对土壤有机碳矿化影响的比较. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 530-538.
- [33] 李品荣, 孟广涛, 方向京. 滇东南石漠化山地不同植被恢复模式下土壤地力变化和水土流失状况研究. *水土保持学报*, 2008, 22(6): 35-39.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 1 January, 2011 (Semimonthly)

## CONTENTS

Spatial pattern analysis of a <i>Rhododendron-Abies</i> virginal forest near timberline on the eastern edge of Qinghai-Tibetan Plateau, China	MIAO Ning, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al ( 1 )
Changes of liana species diversity in different restoration stages of monsoonal broad-leaved evergreen forest	LI Shuaifeng, SU Jianrong, LIU Wande, et al ( 10 )
Investigation on spatio-temporal pattern of cyanobacterial community structure by T-RFLP during overwinter and recruitment period in Taihu Lake	GU Tingting, KONG Fanxiang, TAN Xiao, et al ( 21 )
Food sources of fish and macro-invertebrates in a tropical seagrass bed at Xincun Bay, Southern China	FAN Minling, HUANG Xiaoping, ZHANG Dawen, et al ( 31 )
Spatial pattern of Scleractinian coral Population Structure in Weizhou Island, Beihai, Guangxi	LIANG Wen, ZHANG Chunhua, YE Zuchao, et al ( 39 )
Property of root distribution of triploid <i>Populus tomentosa</i> and its relation to root water uptake under the wide-and-narrow row spacing scheme	XI Benye, WANG Ye, JIA Liming, et al ( 47 )
Soil nutritional properties and moisture gradient of the ecotone between dry valley and montane forest of the Minjiang River	LIU Bin, LUO Chengde, ZHANG Jian, et al ( 58 )
Signal chemical salicylic acid mitigates the negative effects of drought on photosynthesis and membrane lipid peroxidation of purple majesty	YI Xiaolin, YANG Bingxian, ZONG Xuefeng, et al ( 67 )
Effects of supplementary UV-B radiation on life cycle forms and the accumulation of taxanes of <i>Taxus chinensis</i> var. <i>mairei</i>	YU Jinghua, LI Dewen, PANG Haihe, et al ( 75 )
Effect of simulated nitrogen deposition on the soil respiration of <i>Lithocarpus glabra</i> and <i>Castanopsis sclerophylla</i>	LI Kai, JIANG Hong, YOU Meina, et al ( 82 )
Changes of phenolic acids in the soil of replanted apple orchards surrounding Bohai Gulf	SUN Haibing, MAO Zhiquan, ZHU Shuhua ( 90 )
Growing dynamic root system of <i>Aquilaria malaccensis</i> and <i>Aquilaria sinensis</i> seedlings in response to different fertilizing methods	WANG Ran, LI Jiyue, ZHANG Fangqiu, et al ( 98 )
Accumulation and tolerance of <i>Salix variegata</i> and <i>Pterocarya stenoptera</i> seedlings to cadmium	JIA Zhongmin, WEI Hong, SUN Xiaocan, et al ( 107 )
Dynamics of vegetation structure and soil properties in the natural restoration process of degraded woodland on the northern slope of Qilian Mountains, northwestern China	ZHAO Chengzhang, SHI Fuxi, DONG Xiaogang, et al ( 115 )
Relationship between temperature and $\delta^{13}\text{C}$ values of C3 herbaceous plants and its implications of WUE in farming-pastoral zone in North China	LIU Xianzhao, WANG Guoan, LI Jiazhu, et al ( 123 )
Carbon dynamics of fine root ( grass root ) decomposition and active soil organic carbon in various models of land use conversion from agricultural lands into forest lands	RONG Li, LI Shoujian, LI Xianwei, et al ( 137 )
Prey biomass of the Amur tiger ( <i>Panthera tigris altaica</i> ) in the eastern Wanda Mountains of Heilongjiang Province, China	ZHOU Shaochun, ZHANG Minghai, SUN Haiyi ( 145 )
The impact of conservation projects on giant Panda Habitat	ZHANG Yubo, WANG Mengjun, LI Junqing ( 154 )
Fluctuation of soil fauna community during defoliation decomposition under lime and EM treatment	GAO Meixiang, ZHANG Xueping ( 164 )
Comparative of feeding behaviors of <i>Sitobion avenae</i> , <i>Sitobion graminum</i> and <i>Rhopalosiphum padi</i> (Homoptera: Aphididae) using electrical penetration graph (EPG)	MIAO Jin, WU Yuqing, YU Zhenxing, et al ( 175 )
Toxic effects of <i>ent</i> -kaurane diterpenoids on soil ciliate communities	NING Yingzhi, DU Haifeng, WANG Hongjun ( 183 )
Geostatistical analysis and sampling technique on spatial distribution pattern of <i>Dendroctonus valens</i> population	PAN Jie, WANG Tao, ZONG Shixiang, et al ( 195 )
Variation analysis of protein subunits of soybean germplasms of different eco-types in Shanxi	WANG Yanping, LI Guiquan, GUO Shujin, et al ( 203 )
Effects of fertilization and plastic film mulched ridge-furrow cultivation on yield and water and nitrogen utilization of winter wheat on dryland	LI Tingliang, XIE Yinghe, REN Miaomiao, et al ( 212 )
The changing characteristics of potential climate productivity in Gansu Province during nearly 40 years	LUO Yongzhong, CHENG Ziyong, GUO Xiaoqin ( 221 )
Spatial assessment and zoning regulations of ecological importance based on GIS for rural habitation in Changgang Town, Xinguo county	XIE Hualin, LI Xiubin ( 230 )
Influences of rural households' income differences on living energy consumption and eco-environment: a case study of Jiangnan Plain, China	YANG Zhen ( 239 )
Spatial differences and its driving factors of energy indices on cultivated land eco-economic system in Hebei Province	WANG Qian, JIN Xiaobin, ZHOU Yinkang, et al ( 247 )
Effects of land use on distribution and protection of organic carbon in soil aggregates in karst rocky desertification area	LUO Youjin, WEI Chaofu, LI Yu, et al ( 257 )
<b>Review and Monograph</b>	
Implication and limitation of landscape metrics in delineating relationship between landscape pattern and soil erosion	LIU Yu, LÜ Yihe, FU Bojie ( 267 )
Ecological reclamation and restoration of abandoned coal mine in the United States	ZHANG Chengliang, B. Larry Li ( 276 )
Managing farmland soil food web: principles and methods	CHEN Yunfeng, HU Cheng, LI Shuanglai, et al ( 286 )

# 2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊\*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次, 全国排名第 1; 影响因子 1.812, 全国排名第 14; 第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊; 中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生态学报  
(SHENGTAI XUEBAO)  
(半月刊 1981 年 3 月创刊)  
第 31 卷 第 1 期 (2011 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 31 No. 1 2011

**编 辑** 《生态学报》编辑部  
地址: 北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码: 100085  
电话: (010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

**主 编** 冯宗炜  
**主 管** 中国科学技术协会  
**主 办** 中国生态学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址: 北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码: 100085

**出 版** 科 学 出 版 社  
地址: 北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码: 100717

**印 刷** 北京北林印刷厂  
**发 行** 科 学 出 版 社  
地址: 东黄城根北街 16 号  
邮政编码: 100717  
电话: (010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

**订 购** 全国各地邮局  
**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
地址: 北京 399 信箱  
邮政编码: 100044

**广告经营** 京海工商广字第 8013 号  
**许 可 证**

**Edited** by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel: (010)62941099  
www.ecologica.cn  
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

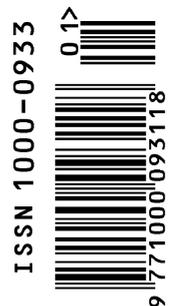
**Editor-in-chief** FENG Zong-Wei  
**Supervised** by China Association for Science and Technology  
**Sponsored** by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

**Published** by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

**Printed** by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

**Distributed** by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel: (010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

**Domestic** All Local Post Offices in China  
**Foreign** China International Book Trading  
Corporation  
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元