

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第17期 Vol.32 No.17 **2012**

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 32 卷 第 17 期

2012 年 9 月 (半月刊)

目 次

基于生物生态因子分析的长序榆保护策略.....	高建国,章 艺,吴玉环,等 (5287)
闽江口芦苇沼泽湿地土壤产甲烷菌群落结构的垂直分布.....	余晨兴,仝 川 (5299)
涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响.....	刘 渡,李 俊,于 强,等 (5309)
地下滴灌下土壤水势对毛白杨纸浆林生长及生理特性的影响.....	席本野,王 焯,邸 楠,等 (5318)
绿盲蝽危害对枣树叶片生化指标的影响.....	高 勇,门兴元,于 毅,等 (5330)
湿地资源保护经济学分析——以北京野鸭湖湿地为例.....	王昌海,崔丽娟,马牧源,等 (5337)
湿地保护区周边农户生态补偿意愿比较.....	王昌海,崔丽娟,毛旭峰,等 (5345)
湿地翅碱蓬生物量遥感估算模型.....	傅 新,刘高焕,黄 翀,等 (5355)
增氮对青藏高原东缘典型高寒草甸土壤有机碳组成的影响.....	郑娇娇,方华军,程淑兰,等 (5363)
大兴安岭 2001—2010 年森林火灾碳排放的计量估算.....	胡海清,魏书精,孙 龙 (5373)
基于水分控制的切花百合生长预测模型.....	董永义,李 刚,安东升,等 (5387)
极端干旱区增雨加速泡泡刺群落土壤碳排放.....	刘殿君,吴 波,李永华,等 (5396)
黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应.....	许明祥,王 征,张 金,等 (5405)
小兴安岭 5 种林型土壤呼吸时空变异	史宝库,金光泽,汪兆洋 (5416)
疏勒河上游土壤磷和钾的分布及其影响因素.....	刘文杰,陈生云,胡凤祖,等 (5429)
COII 参与茉莉酸调控拟南芥吲哚族芥子油苷生物合成过程	石 璐,李梦莎,王丽华,等 (5438)
Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用	王艳萍,王 力,卫三平 (5445)
三峡水库消落区不同海拔高度的植物群落多样性差异.....	刘维湄,王 杰,王 勇,等 (5454)
基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系	苏宏新,李广起 (5467)
山地枣树茎直径对不同生态因子的响应.....	赵 英,汪有科,韩立新,等 (5476)
幼龄柠条细根的空间分布和季节动态	张 帆,陈建文,王孟本 (5484)
山西五鹿山白皮松群落乔灌木层的种间分离.....	王丽丽,毕润成,闫 明,等 (5494)
长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响.....	马晓霞,王莲莲,黎青慧,等 (5502)
基于归一化法的小麦干物质积累动态预测模型.....	刘 娟,熊淑萍,杨 阳,等 (5512)
上海环城林带景观美学评价及优化策略	张凯旋,凌焕然,达良俊 (5521)
旅游风景区旅游交通系统碳足迹评估——以南岳衡山为例.....	窦银娣,刘云鹏,李伯华,等 (5532)
一种城市生态系统现状评价方法及其应用.....	石惠春,刘 伟,何 剑,等 (5542)
黄海中南部细纹狮子鱼的生物学特征及资源分布的季节变化.....	周志鹏,金显仕,单秀娟,等 (5550)
蓝藻堆积和螺类牧食对苦草生长的影响.....	何 虎,何宇虹,姬娅婵,等 (5562)
黑龙江省黄鼬冬季毛被分层结构及保温功能.....	柳 宇,张 伟 (5568)
虎纹蛙选择体温和热耐受性在个体发育过程中的变化	樊晓丽,雷焕宗,林植华 (5574)
水丝蚓对太湖沉积物有机磷组成及垂向分布的影响	白秀玲,周云凯,张 雷 (5581)
专论与综述	
城市绿地生态评价研究进展.....	毛齐正,罗上华,马克明,等 (5589)
全球变化背景下生态学热点问题研究——第二届“国际青年生态学者论坛”	万 云,许丽丽,耿其芳,等 (5601)
研究简报	
雅鲁藏布江高寒河谷流动沙地适生植物种筛选和恢复效果.....	沈渭寿,李海东,林乃峰,等 (5609)
学术信息与动态	
生态系统服务时代的来临——第五届生态系统服务伙伴年会述评	吕一河,卫 伟,孙然好 (5619)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 334 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-09	



封面图说: 带雏鸟的白枕鹤一家——白枕鹤是一种体型略小于丹顶鹤的优美的鹤。体羽蓝灰色,腹部较深,背部较浅,脸颊两侧红色,头和颈的后部及上背为白色,雌雄相似。其虹膜暗褐色,嘴黄绿色,脚红色。白枕鹤常常栖息于开阔平原芦苇沼泽和水草沼泽地带,有时亦出现于农田和海湾地区,尤其是迁徙季节。主要以植物种子、草根、嫩叶和鱼、蛙、软体动物、昆虫等为食。繁殖区在我国北方和西伯利亚东南部。我国白枕鹤多在黑龙江、吉林、内蒙古繁殖,与丹顶鹤的繁殖区几乎重叠,为国家一级保护动物。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201204050476

郑娇娇, 方华军, 程淑兰, 于贵瑞, 张裴雷, 徐敏杰, 李英年. 增氮对青藏高原东缘典型高寒草甸土壤有机碳组成的影响. 生态学报, 2012, 32(17): 5363-5372.

Zheng J J, Fang H J, Cheng S L, Yu G R, Zhang P L, Xu M J, Li Y N. Effects of N addition on soil organic carbon components in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5363-5372.

增氮对青藏高原东缘典型高寒草甸土壤 有机碳组成的影响

郑娇娇¹, 方华军², 程淑兰^{1,*}, 于贵瑞², 张裴雷¹, 徐敏杰¹, 李英年³

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘要: 土壤有机碳动态是陆地生态系统碳平衡研究的关键环节, 有关青藏高原高寒草甸土壤有机碳组成对大气氮沉降增加的响应研究至今尚未开展。基于中国科学院海北生态站的大气氮沉降模拟控制实验平台, 于 2010 年 5 月、7 月和 9 月中旬分别测定不同施氮处理下 0—10cm、10—20cm、20—30cm 土壤中粗颗粒态有机碳 (CPOC)、细颗粒态有机碳 (FPOC) 和矿质结合有机碳 (MOC) 含量, 研究不同施氮类型 (NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 KNO_3) 和施氮水平 (0、10、20、40 $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 对土壤 POC 和 MOC 含量以及 POC/MOC 比值的影响。结果表明: 青藏高原高寒草甸土壤 POC 积聚在土壤表层, 占总土壤有机碳 (SOC) 含量的 64% 以上, 稳定性较差。施氮水平显著改变了土壤 CPOC、FPOC 和 MOC 含量, 而施氮类型的影响不显著。不同月份土壤 POC 和 MOC 含量对增氮的响应不同, 反映了 SOC 组分对增氮响应的时空异质性。在生长季中期, 施氮倾向于增加表层土壤 POC 含量, 而在生长季初期和末期恰好相反。土壤 MOC 对增氮的响应不敏感。另外, 施氮显著降低生长季初期表层土壤 POC/MOC 比例, SOC 稳定性增加。表明, 青藏高原高寒草甸土壤有机碳活性组分较高, 未来大气氮沉降增加短期内即可降低活性有机碳含量, 相应地改变了其组成和稳定性。

关键词: 大气氮沉降; 颗粒态有机碳; 矿质结合态有机碳; 土壤有机质稳定性; 高寒草甸

Effects of N addition on soil organic carbon components in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau

ZHENG Jiaojiao¹, FANG Huajun², CHENG Shulan^{1,*}, YU Guirui², ZHANG Peilei¹, XU Minjie¹, LI Yingnian³

1 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810001, China

Abstract: Increasing atmospheric nitrogen (N) deposition caused by human activities significantly changes carbon cycles and carbon budgets in terrestrial ecosystems. Compared with plant carbon pools, soil pools are more complex in their components and they respond in a variety of ways to N addition. Thus, contrasting conclusions have been reached as to the consequences of N addition for carbon storage in N-limited forest and grassland ecosystems including promotion, no change and inhibition. Alpine meadows are a N-limited grassland ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, where plants and soil microorganisms have adapted to the environment of low available N. N addition might be expected to affect inputs and

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31070435, 41071166, 31130009); 国家重点基础研究发展计划项目 (2010CB833502, 2010CB833501, 2012CB417103); 中国科学院地理科学与资源研究所“秉维”优秀青年人才基金项目 (2011RC202); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05050600) 资助

收稿日期: 2012-04-05; 修订日期: 2012-06-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: slcheng@gucas.ac.cn

outputs of soil organic carbon (SOC) via changing returns of plant residues and soil CO₂ release. However, a related study of this ecosystem has not so far been carried out. To assess the effects of atmospheric N deposition on SOC dynamics and the stability of an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, a multi-form, low-level N addition experiment was conducted at the HaiBei Alpine Meadow Ecosystem Research Station in 2007. Three N fertilizers, NH₄Cl, (NH₄)₂SO₄, and KNO₃, were added at four rates: control (0 kg N·hm⁻²·a⁻¹), low N (10 kg N·hm⁻²·a⁻¹), medium N (20 kg N·hm⁻²·a⁻¹), and high N (40 kg N·hm⁻²·a⁻¹). Each N treatment had three replicates. Each plot had an area of 9 m² (3 m × 3 m) and a 2 m isolation band was established between adjacent plots. During the 2010 growing season, soil samples were collected to 30cm depth at 10cm intervals in mid-May, July and September. The contents of three size SOC fractions, coarse particulate organic carbon (CPOC, >250μm), fine particulate organic carbon (Fine POC, 53—250μm) and mineral associated organic carbon (MOC, <53μm) as well as POC/MOC ratios were measured to examine the dynamics, shifts and stability of SOC caused by N addition. Soil POC in the alpine meadow mainly accumulated in the top 10cm and accounted for more than 64% of the total SOC content, reflecting the lability and poor stability of the soil organic matter. Three-year N addition significantly changed the contents of soil CPOC, FPOC and MOC, and there were significant differences between various N levels, rather than N forms. Both soil POC and MOC responded in contrasting ways to N addition in the early, end and peak of the growing season, suggesting that temporal variability in the dynamics of SOC components responded to N addition. N addition tended to increase soil CPOC and FPOC contents in the peak of the growing season, while significantly reducing them in the early and end of the growing season. However, soil MOC content responded insensitively to N addition. N addition also significantly lowered the topsoil POC/MOC ratio in the early growing season, suggesting an increase in the stability of SOC. These results suggest that increasing atmospheric nitrogen deposition in the future may cause significant short-term changes in soil organic carbon composition and stability in the alpine meadow due to its lability.

Key Words: atmospheric nitrogen deposition; particulate organic carbon; mineral-associated organic carbon; soil organic matter stability; alpine meadow

陆地生态系统碳储量动态是全球碳平衡研究的关键环节之一。当前,全球碳循环研究中的一个关键科学问题是已知的碳汇和碳源并不平衡,数量上存在一个约 2—4 PgC/a 的“未知汇”^[1]。由于碳氮循环过程的紧密耦合,大气氮沉降增加会引起陆地生态系统碳循环过程和碳平衡发生显著变化,是正确解释未知碳汇分布的重要途径之一。然而,目前有关氮沉降驱动的陆地生态系统固碳率存在很大分歧^[2-3]。例如,De Vries 等^[2]发现每沉降 1 kg N 导致欧洲森林碳固定增加 30—70 kgC, Högberg^[4]的研究结果为 60 kgC/kgN, 然而 Magnani 等^[5]认为氮沉降导致温带和北方森林生态系统固碳率高达 726 kgC/kgN, 平均为 400 kgC/kgN。相对于地上植被碳储量而言,地下碳循环过程和碳储量动态更为复杂,导致陆地生态系统碳固定对氮沉降增加的响应存在很大的不确定性。

土壤有机质(SOM)是由不同分解阶段和不同周转速率的有机物组成,采用化学或物理方法,可将 SOM 库分成不同的组分。由于强烈的化学分组方法改变了有机质的某些自然性质,不能反映 SOM 的真正形态和结构。通过物理方法(如振荡、分散或重液悬浮)分离出分布在团聚体间和团聚体内的有机质,可用来解释不同 SOM 库与土壤结构之间的关系^[6]。按照粒径大小可将 SOM 分为颗粒态有机质(Particulate Organic Matter, POM, >53μm)和矿质结合态有机质(Mineral-associated Organic Matter, MOM, <53μm)^[6]。其中,颗粒态有机碳(POC)通常由最近加入的未分解或半分解的动植物和根系残体组成,是相对未受保护的有效碳库,对环境条件变化敏感^[7]。而矿质结合态有机碳(MOC)是与粘粒和粉粒结合的那部分碳,其形成年代较老,性质较稳定^[7]。土壤 POC 对氮输入的响应有增加^[8]、降低^[9]和不变^[10]等多种结论,取决于植物残体、根系分泌物输入和土壤微生物消耗输出之间的平衡^[9-10];但普遍认为对 MOC 含量影响不大。上述研究结论的分歧表明,土壤

不同活性碳组分对氮素输入的响应机制仍然不清楚,难以阐明不同碳组分之间的转移和累积特征。

关于土地利用转变、土壤侵蚀和土壤管理措施(耕作、施肥和秸秆还田等)对土壤有机碳组成的影响研究相对较多^[11-12],但针对天然草地土壤碳组分动态对多形态、低剂量氮素输入的响应研究却鲜有报道。青藏高原被称为“地球第三极”,对大气氮沉降增加的响应十分敏感,具有重要的监测和研究意义^[13]。高寒草甸是青藏高原典型的地带性植被之一,面积约 $51.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,1m 深土壤碳储量估计为 4.68 pgC ,约占全国土壤碳储量的 $1/10$ ^[14]。其中,土壤有机氮占总氮的 94%^[15],是典型的受氮限制的生态系统,为研究土壤有机碳、氮动态对增氮响应提供了理想的平台。本研究的主要目的是基于中科院海北生态站的大气氮沉降模拟控制实验平台,采用颗粒分组法探讨高寒草甸土壤不同粒径有机碳组分随土壤深度和季节的变化格局,阐明施氮剂量和类型对土壤有机碳组成的影响。研究结果有助于阐明典型高寒草甸土壤有机碳组成与时空变化特征,有助于揭示大气氮沉降增加对土壤有机碳累积与转化的影响机制,并可为高寒草甸生态系统碳氮管理提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站西北 1km 处的风匣口(北纬 $37^\circ 37'$,东经 $101^\circ 19'$),地势平坦开阔,海拔 3220m。气候类型为高原大陆性气候,夏季凉爽多雨,冬季寒冷、干燥多风。年均温 -1.7°C ,最高温(7 月)和最低温(1 月)分别为 9.8°C 和 -14.8°C ;年均降水量 580mm,其中 80% 集中于 5—9 月^[16]。植被建群种为矮嵩草(*Kobresia humilis*),主要优势种为垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、异针茅(*Stipa aliena*)、麻花艽(*Gen tiana straminea*)、甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)和紫羊茅(*Festuca rubra*)等。土壤类型为草毡寒冻锥形土,土壤发育年轻,有机质含量丰富^[16]。

1.2 试验设计

参照青藏高原海北站实际大气氮沉降量($8.7\text{—}13.8 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[17],以及大气沉降氮的两种形态(氧化态 NO_3^- 和还原态 NH_4^+),于 2007 年 5 月设置了低氮($10 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、中氮($20 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、高氮($40 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)三种水平和 NH_4Cl 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 KNO_3 三种类型的施氮控制实验,分别模拟未来大气氮沉降增加 1 倍、2 倍和 4 倍情景下高寒草甸生态系统碳、氮循环关键过程的变化。实验采用完全随机裂区设计,以施氮水平为主处理,施氮类型为副处理,每个施氮水平下设置一个对照(CK)以消除微地形等环境异质性对实验结果的可能影响,3 次重复。本实验共包括 9 个裂区,每个裂区由对照和 3 种氮肥类型组成,共 36 个样方;小样方大小为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,小样方间隔为 2 m。每年生长季(5—9 月)每月月初将氮肥溶于 20 L 水中(增加的水量相当于年降水量的 4.6%),利用喷雾器均匀喷洒于样方内,对照样方则喷洒相同数量的水以消除处理间因外加水对生物地球化学循环的可能影响。每年 10 月中旬将非生长季(11 月—翌年 4 月)氮肥一次性施入土壤中。所有样方位于冬季牧场,生长季不放牧。

1.3 土壤样品采集与测定

在 2010 年生长季初期(5 月中旬)、中期(7 月中旬)和末期(9 月中旬),在每个样方利用土钻(直径 2.5cm)沿样方对角线随机采集 5 个土壤样品,采样深度为 30cm,土层间隔为 10cm,相同土层样品均匀混合组成一个样品。土样采集后,立即过 2mm 土壤筛去除砾石和植物残体,于常温下风干保存。土壤不同粒径有机碳含量的测定方法可参考文献^[18]:称取 20g 风干土于 250ml 的塑料瓶中,加入 5g/L 六偏磷酸钠溶液 100mL,在往复式振荡器上振荡 2h。分散液和土壤全部置于 $53\mu\text{m}$ 和 $250\mu\text{m}$ 套筛上,用细水流冲洗样品至沥滤液澄清(即不含细土颗粒为止)。转移筛上土壤至预先称重的烧杯中,于 60°C 下烘干称重。根据筛网孔径大小分为粗颗粒态有机碳(Coarse POC, CPOC, $>250\mu\text{m}$)和细颗粒态有机碳(Fine POC, FPOC, $53\text{—}250\mu\text{m}$),筛下土壤为矿质结合态有机碳(MOC, $<53\mu\text{m}$)。样品磨细过 100 目筛,利用元素分析仪(Elementa, Germany)测定其碳浓度(%),再根据各粒径的重量百分比计算其碳含量(g/kg)。

1.4 统计分析

考虑到 3 个裂区样地本身的异质性,文中土壤有机碳组分含量的净变化(Δ)为各施氮处理减去相应对

照后的差值。利用单因素方差分析(One-Way ANOVA)比较自然状态下某一月份或某一土层各土壤有机碳组分含量的差异,利用 Duncan 进行多重比较;采用重复测量方差分析(Repeated measures ANOVA, RANOVA)比较不同施氮处理下不同土层不同粒径土壤有机碳组分含量的差异。其中月份为因素内变量,施氮剂量和类型为因素间变量,分别选择 Pillar's Trace 和 Mauchly's Test of Sphericity 进行显著性检验。利用 SPSS 16.0 软件进行统计分析,显著性水平为 0.05,利用 SigmaPlot 10.0 软件进行统计绘图。

2 结果与分析

2.1 颗粒态有机碳含量的变化

自然状态下(对照处理),高寒草甸土壤粗颗粒态有机碳(CPOC)和细颗粒态有机碳(FPOC)含量均随土壤深度增加急剧下降,不同土层两个粒径 POC 含量差异显著(表 1)。土壤 CPOC 和 FPOC 具有明显的季节动态,5 月份最高,7 月份最低,9 月份呈回升趋势(表 1)。0—10cm 层土壤 MOC 含量的季节变化正好相反,峰值出现在 7 月。就 0—10cm 层土壤而言,CPOC 含量变化范围为 12.31—16.74 g/kg,相应地低于 FPOC 含量(12.52—19.26 g/kg)(表 1)。另外,0—10cm 层土壤 MOC 含量变化范围为 15.60—22.49 g/kg,7 月份低于两个粒径 POC 含量,而在 5 月和 9 月正好相反。SOC 近似等于 3 个粒径有机碳组分含量之和,POC(CPOC+FPOC)含量占总 SOC 含量的 53.71%—71.66%,平均为 64.29%。由此可见,高寒草甸土壤有机碳不稳定组分所占比例很大。

表 1 2010 年生长季自然状态下(对照处理)不同粒径土壤有机碳组分含量

Table 1 Contents of soil organic carbon components with different size in control plots during the 2010 growing season

土层/cm Soil depth	CPOC 含量*			FPOC 含量*			MOC 含量*		
	CPOC Content(g/kg)			FPOC Content(g/kg)			MOC Content(g/kg)		
	5 月	7 月	9 月	5 月	7 月	9 月	5 月	7 月	9 月
0—10	17.62Aa (1.55)	12.02Ba (1.31)	13.61Ba (1.21)	21.98Aa (3.09)	14.08Ba (1.37)	18.80ABa (2.59)	15.66Ba (1.39)	22.49Aa (3.18)	15.60Ba (1.11)
10—20	8.08Ab (0.89)	6.48Ab (0.68)	7.06Ab (0.33)	9.24Ab (0.97)	7.10Ab (0.68)	8.94Ab (1.07)	17.10Aa (1.25)	16.14ABb (0.78)	14.17Bab (0.76)
20—30	3.86ABc (0.57)	2.64Bc (0.26)	4.57Ac (0.61)	6.11Ab (0.95)	5.03Ab (0.63)	5.04Ab (0.49)	13.75Aa (1.18)	13.58Ab (1.15)	12.14Ab (0.65)

* 数据为平均值±标准误差;同行中不同大写字母表示同一土层不同月份间差异显著,同列中不同小写字母表示同一月份下不同土层间差异显著

施氮 3a 显著改变了 SOC 组分含量。重复测量方差分析结果显示:施氮引起 CPOC 和 FPOC 含量的净变化量(Δ CPOC 和 Δ FPOC)在不同月份差异显著($P<0.001$,表 2);同一月份,不同土层间 Δ CPOC 和 Δ FPOC 差异显著($P<0.001$,表 2)。并且,施氮水平显著改变了土壤 CPOC 和 FPOC 含量($P=0.014$ 和 $P=0.001$),但是施氮类型的影响不显著($P>0.05$,表 2)。另外,同一月份下,施氮水平和施氮类型对 FPOC 含量有显著的交互作用($P=0.041$,表 2)。总的来说,施氮 3a 导致土壤 CPOC 和 FPOC 含量下降了 1.14% 和 3.81% (表 1,图 1 和图 2)。

然而,施氮效应在不同月份和不同土层中表现并不一致。就土壤 CPOC 而言,施氮降低 5 月份 10cm 层土壤 CPOC 含量,并且高氮处理降低效应最显著;7 月份,施氮倾向于增加土壤 CPOC 含量,但施氮效应在统计学上不显著;9 月份,低氮和中氮倾向于增加 CPOC 含量,而高氮显著降低 CPOC 含量。从整个生长季平均值来看,高氮处理显著降低了土壤 CPOC 含量,除了 20—30cm 层的低氮处理外,亚表层(10—20cm 和 20—30cm)土壤 CPOC 含量变化幅度较小,趋势不明显(图 1)。

土壤 FPOC 含量对增氮的响应与 CPOC 含量十分相似,表现在两个方面。第一,施氮对 0—10cm 层土壤 FPOC 含量的影响要大于 10—20cm 和 20—30cm 两个亚表层。第二,施氮倾向于降低 5 月和 9 月 0—10cm 层土壤 FPOC 含量,其中 5 月份低氮处理和 9 月份中氮处理与对照之间的差异显著;另外,施氮也倾向于增加 7 月份不同土层 FPOC 含量,但施氮效应未达到统计显著水平。从整个生长季来看,施氮倾向于降低土壤 FPOC

含量,但统计学上不显著。研究结果表明,CPOC 和 FPOC 在生长季中期和生长季初末期两者对增氮的响应不同(图 2)。

表 2 月份、土层、施氮水平及类型对不同有机碳组分含量影响的重复测量方差分析

Table 2 Repeated Measures ANOVA results on the effects of various factors (month, soil depth, N level and N form) on soil organic carbon components

分析处理 Treatment	△CPOC	△FPOC	△MOC	POC/MOC
组内变异 Within Subjects	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>
月份 Month	<0.001	<0.001	0.611	<0.001
月份×土层 Month×depth	<0.001	<0.001	0.012	0.037
月份×施氮水平 Month×N Level	0.014	0.001	0.009	0.031
月份×施氮类型 Month×N Type	0.545	0.784	0.947	0.765
月份×施氮水平×施氮类型 Month×N Level×N Type	0.076	0.041	0.721	0.118
组间变异 Between Subjects	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>
土层 Depth	0.355	0.238	0.730	<0.001
施氮水平 N Level	0.004	0.426	0.132	0.515
施氮类型 N Type	0.771	0.697	0.042	0.279
施氮水平×施氮类型 N Level×N Type	0.855	0.496	0.174	0.561

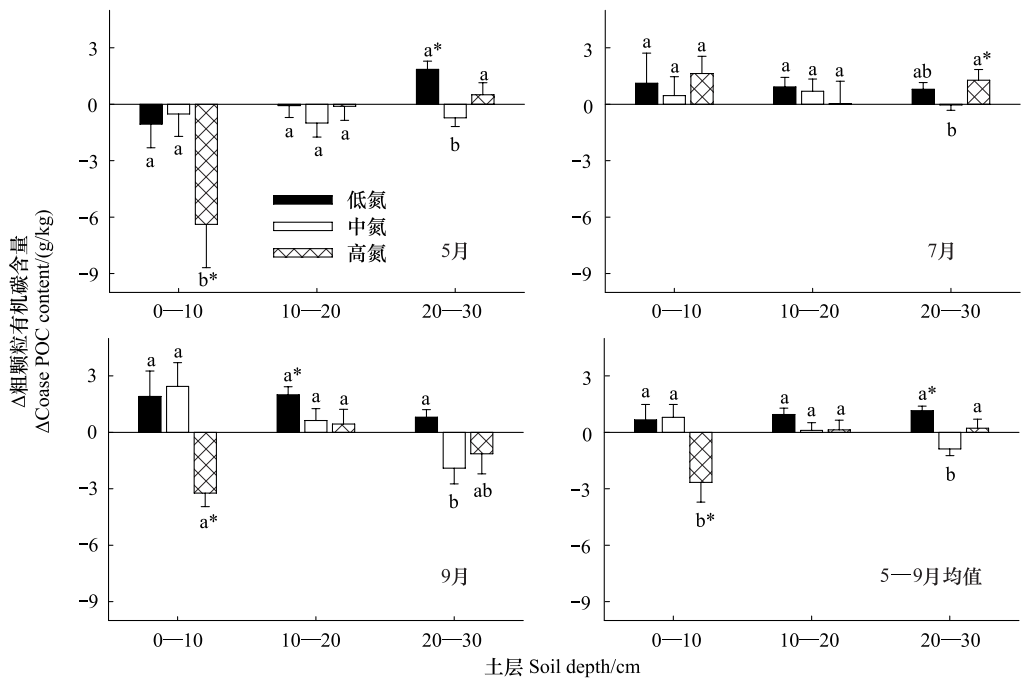


图 1 不同施氮水平下各层土壤 CPOC 含量的净变化

Fig.1 The net variation of coarse POC contents caused by N addition in different months and soil horizons

不同字母表示氮素处理间有显著性差异; * 表示氮素处理与对照间差异显著

2.2 矿质结合态有机碳含量的变化

整个土壤剖面 MOC 变化范围为 12.14—22.49 g/kg,平均占总 SOC 含量的 35.71%(表 1)。重复测量方差分析结果表明,土壤 MOC 含量季节变化不显著($P=0.611$,表 2)。除 5 月份外,土壤 MOC 含量随土壤深度增加而下降,不同土层间土壤 MOC 含量差异显著($P=0.012$,表 1 和表 2)。同一月份下,施氮水平显著影响土壤 MOC 含量($P=0.009$,表 2),而施氮类型影响不显著,并且施氮水平和施氮类型之间无显著的交互作用($P>0.05$,表 2)。同样,施氮对土壤 MOC 的净效应也因季节和土层而异,与土壤 POC 含量对增氮的响应格局

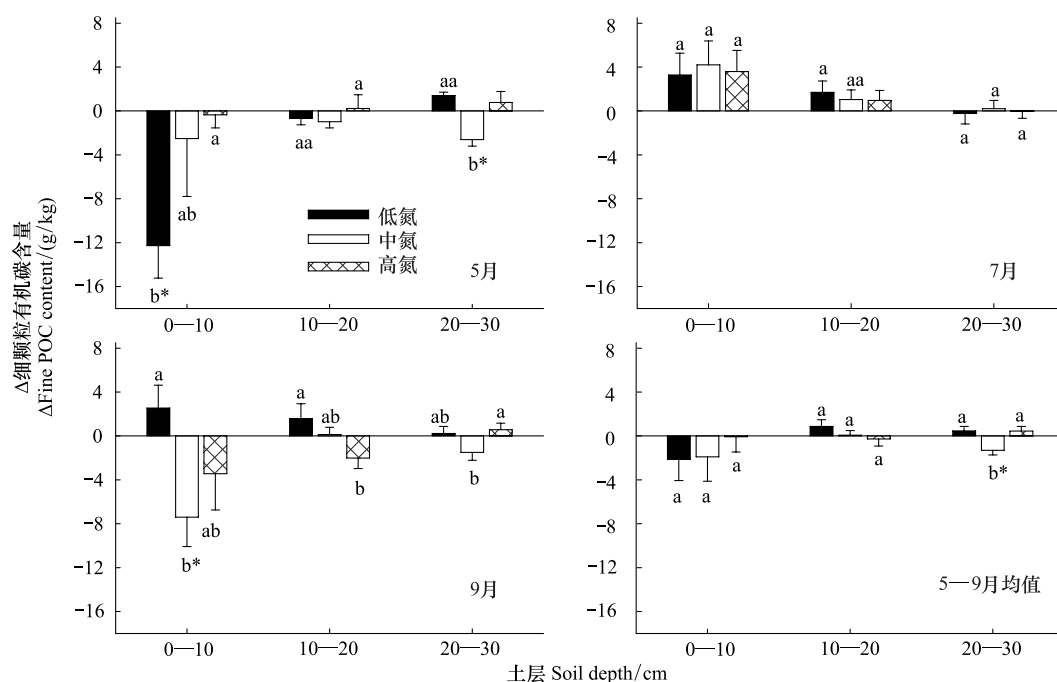


图2 不同施氮水平下各层土壤 FPOC 含量的净变化

Fig. 2 The net variation of Fine POC contents caused by N addition in different months and soil horizons

不同字母表示氮素处理间有显著性差异; * 表示氮素处理与对照间差异显著

正好相反。施氮 3a 倾向于增加 5 月份和 9 月份 0—10cm 层土壤 MOC 含量; 7 月份, 低氮和中氮处理降低土壤 MOC 含量, 而高氮处理则相反。就整个生长季而言, 施氮没有显著改变整个土层 MOC 的含量(图 3)。

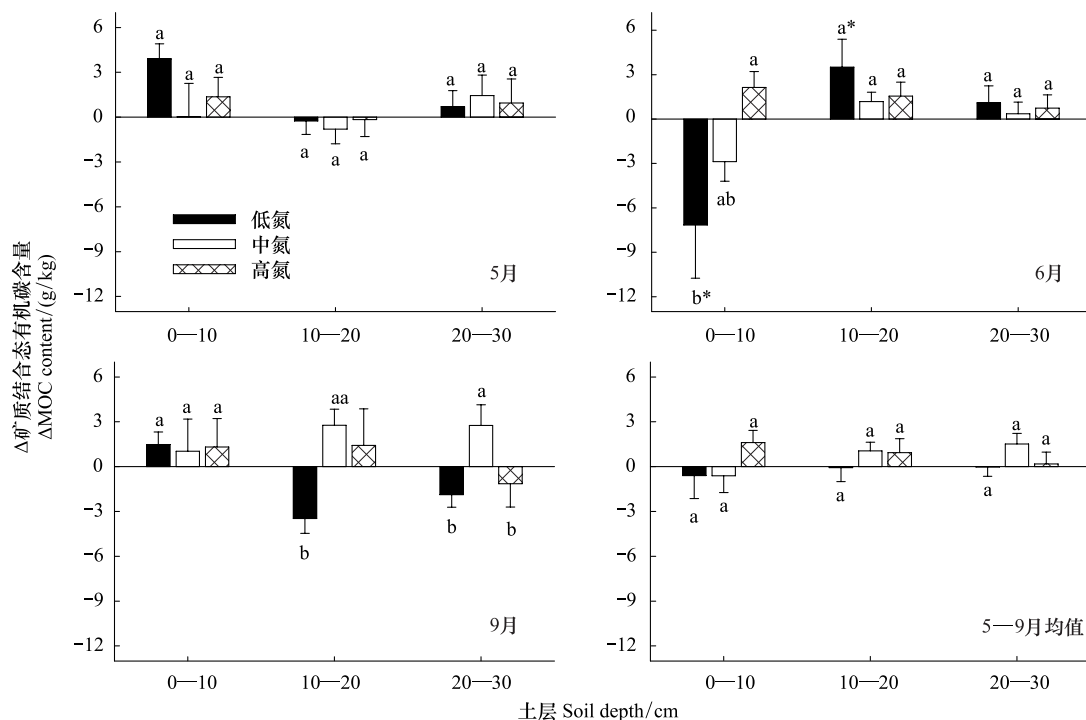


图3 不同施氮水平下各层土壤 MOC 含量的净变化

Fig. 3 The net variation of MOC contents caused by N addition in different months and soil horizons

不同字母表示氮素处理间有显著性差异; * 表示氮素处理与对照间差异显著

2.3 POC/MOC 比值的变化

POC/MOC 比值在一定程度上反映了土壤有机质的稳定性,其值越大说明土壤有机质越不稳定。重复测量方差分析结果表明:POC/MOC 的季节变化显著($P=0.037$,表 2,图 4),7 月份土壤 POC/MOC 低于 5 月份和 9 月份,即生长季中期土壤有机质较生长季初末期更加稳定。同一月份下 POC/MOC 随土壤深度增加而显著下降($P=0.037$,表 2 和图 4),说明下层土壤较表层土壤更加稳定。就施氮效应而言,施氮三年只是显著降低了 5 月份 0—10cm 层土壤 POC/MOC 比值,对其它月份和 10cm 以下的亚表层土壤无显著影响(图 4),说明施氮倾向于增加表层土壤有机碳的稳定性。

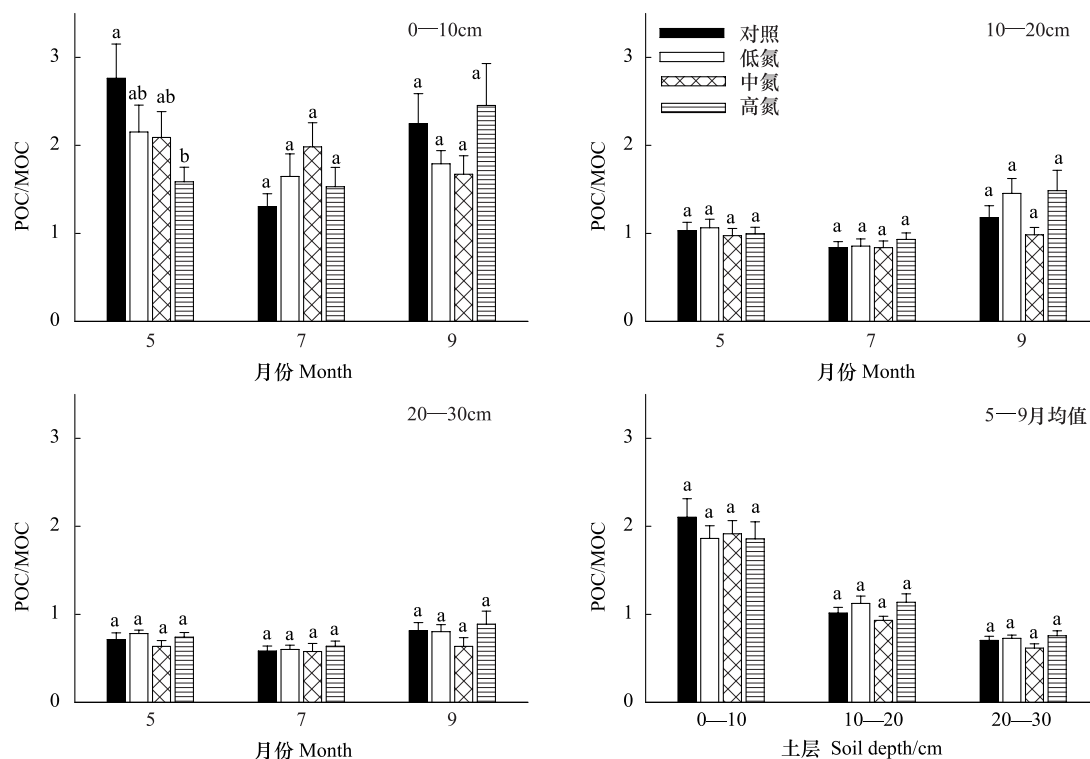


图 4 生长季不同施氮水平下土壤 POC/MOC 比值的变化

Fig. 4 The monthly variation of POC/MOC ratio in three soil horizons under different levels of N addition

不同字母表示氮素处理间存在显著性差异

3 讨论

3.1 土壤颗粒态有机碳动态及其对增氮的响应

土壤 POC 是处于新鲜的动植物残体和腐殖化有机物之间暂时或过渡性的有机物质^[7],是相对未受保护的有效碳库,对环境条件变化敏感^[6]。其周转速度较快(一般为几年到几十年),代表很大比例的“慢”分解有机碳库,介于活性库和惰性库之间^[6]。青藏高原高寒草甸土壤有机碳对大气氮沉降增加响应十分敏感,归因于两个方面。第一,高寒草甸土壤 POC 含量主要积聚在 0—10cm 表层,随土壤深度增加骤减,这与 Franzluebbers 和 Stuedemann^[19]的研究相似。王华静等^[20]的研究结果也表明,随着土壤深度的增加,亚高山草甸土的有机碳含量降低,主要与植物地上部分的枯落物归还量以及根系的垂直分布有关。第二,青藏高原高寒草甸土壤 POC 含量占总 SOC 比例很大。许多研究表明,POC 含量占总 SOC 含量的 10% 以上^[21-22],农田土壤通常低于该值,如常规耕作条件下表层黑土 POC 只占总 SOC 含量的 8.7%^[23]。然而,本研究的高寒草甸土壤表层 POC 含量占总 SOC 含量的 64% 以上,为农田土壤的 6—8 倍,对气候变化和人为干扰的响应会更加敏感。较高的 POC 比例归因于土壤质地较粗,粘粒和粉粒含量较低,与 Heitkamp 等^[24]的研究结果类似。

土壤 POC 含量动态主要取决于植物残体输入和微生物矿化分解之间的平衡。自然状态下,生长季初期

和末期土壤 POC 含量高于生长季中期,体现了土壤 POC 的不稳定性,易于被土壤微生物利用。生长季初期(5 月份),气温和土壤温度都很低,土壤冻融作用强烈,土壤大团聚体破裂释放出包裹于其中的 POM;此时积雪融化土壤水分含量高,导致土壤微生物分解和土壤有机质矿化均很缓慢^[25-26]。因此,上一年未分解的地表凋落物和地下根系残体在土壤表层累积,导致土壤 POC 含量较高。在生长季中期(7 月份),植物生长达到高峰,植物分泌和归还到土壤中的有机质数量较多,但是此时气温达到全年的最高值,微生物分解和有机质矿化都非常快,导致生长季中期土壤 POC 含量累积不明显。9 月份逐渐过渡到生长季的末期,气温下降,微生物分解活动减慢,凋落物开始累积,伴随着土壤 POC 含量开始回升。

土壤 POC 含量动态取决于 POC 形成(植物残体输入)和 POC 损失(微生物分解)之间的平衡。7 月份施氮倾向于增加高寒草甸表层土壤 POC 含量,而在 5 月和 9 月表现完全相反,说明在生长季中期施氮引起的 POC 的产生量要大于土壤微生物对 POC 的分解量,而在生长季初期和末期前者小于后者。另一方面研究结果也反映了土壤 POC 对增氮响应在时间上的异质性。因为土壤 POC 含量与土壤 CO₂ 排放通量正相关^[27-28],所以土壤 CO₂ 排放通量对增氮的响应在一定程度上反映了土壤 POC 的动态变化。朱天鸿等^[25]和 Fang 等^[26]基于青藏高原嵩草草甸氮沉降控制实验平台,发现低剂量氮输入激发了高寒草甸土壤的微生物活性,同时促进了植物的生长,导致 7 月份土壤 CO₂ 排放通量增加最明显。相反,在生长季初期和末期,气温较低导致土壤微生物活性较弱;虽然植物残体归还量较大,但未经微生物分解和胶结作用无法进入到团聚体内部形成 POM。其次,与土壤冻融交替作用相似,施氮也能够加剧土壤团聚体的破坏,释放出包裹于其中的有机胶结物质 POM^[29],间接地导致表层土壤 POC 的损失。再次,在生长季初期和末期,植物对外源性施加的氮素利用较少,无机氮在土壤中累积,降低了土壤有机质的 C/N,导致土壤有机质分解更加迅速^[30]。

3.2 土壤矿质结合态有机碳动态及其对增氮的响应

土壤 MOC 多为有机物的最终分解产物,同时受土壤黏粒和粉粒保护,其形成年代较老,性质较稳定,对 SOC 的固定起着重要作用^[6]。MOC 含量在不同深度之间存在显著差异,随着土层深度的增加 MOC 含量明显降低。这与总 SOC 含量变化格局相一致,与植物残体归还量以及微生物分解能力减小有关。从整个生长季来看,土壤 MOC 含量季节变化不显著,主要归因于它与粘粒矿物、阳离子紧密结合以有机无机复合体的方式存在,分解速度极慢^[14]。土壤 MOC 对增氮的响应在生长季中期和初末期并不相同,反映了土壤 POC 和 MOC 之间的转化。在生长季中期(7 月),低水平的氮输入显著降低了表层 MOC 含量,这与 CPOC 和 FPOC 增加相对应,说明低水平的氮输入倾向于导致土壤惰性有机碳向活性碳组分转移。相反,在生长季初期和末期(5 月和 9 月),施氮加速土壤 POC 的分解,部分未分解的 POC 向 MOC 转化。关于 MOC 在土壤有机碳含量变化上的作用也备受争议,Zinn 等^[31]认为土壤有机碳含量减少主要发生在粗粒部分,梁爱珍等^[32]认为 MOC 对总有机碳的损失起着更为重要的作用。与农田土壤相反,本研究中高寒草甸 SOC 以不稳定的 POC 为主体,占总 SOC 含量的 60%—70%。因此,POC 比 MOC 对 SOC 储量变化的影响可能更为重要。

POC 表征土壤中易被利用的活性有机碳,而 MOC 表征了土壤中相对稳定且周转期长的有机碳,因此 POC/MOC 比值在一定程度上反映了土壤有机质的稳定性^[23]。一般来说,POC/MOC 比值越大,表明土壤有机碳活性高,易于矿化,周转快;反之,则表明土壤有机碳比较稳定,不易被生物所利用^[23]。本研究表明,亚表层土壤较表层土壤更加稳定,主要归因于有机质含量较低和分解时间更长。另外,施氮显著降低了表土 POC/MOC 比值,生长季初期(5 月)表现尤为明显,表明施氮倾向于增加土壤有机碳的稳定性。类似的现象在森林增氮控制实验中也有发现^[33-34]。Michel 等^[35]利用¹³C NMR 波谱分析了施氮对土壤可溶性有机质(DOM)结构的影响,发现矿质氮输入导致土壤 DOM 中缩聚物和芳香化合物发生消耗,DOM 的芳香度和复杂度(即分子浓缩度)增加,残留的 DOM 稳定性增加。朱天鸿^[36]利用三维荧光光谱技术分析了施氮对土壤 DOM 结构的影响,发现施氮 3 年显著降低类酪氨酸、类色氨酸和类富里酸等活性组分,同时增加了 DOM 中类胡敏酸的比例,导致土壤 DOM 芳香度增加,土壤 DOM 结构趋于稳定。

4 结论

本文主要探讨了青藏高原嵩草草甸不同粒径土壤有机碳组分在土壤剖面和生长季各月的变化,以及不同

粒径有机碳组分动态对氮素剂量和形态输入的响应,主要结论如下:

(1) 青藏高原高寒草甸土壤 POC 含量随土壤深度增加急剧下降,季节变化明显,表层土壤 POC 含量占总 SOC 含量的 60% 以上,稳定性较差。

(2) 施氮水平显著改变了土壤 CPOC、FPOC 和 MOC 含量,而施氮类型的影响不显著。不同月份土壤 POC 和 MOC 含量对增氮的响应不同,在生长季中期,施氮倾向于增加表层土壤 POC 含量,而在生长季初期和末期表现为降低。土壤 MOC 含量对增氮的响应不敏感。

(3) 施氮水平显著降低生长季初期表层土壤 POC/MOC 比例,导致 SOC 稳定性增加。

References:

- [1] Schimel D S, House J I, Hibbard J I, Bousquet P, Ciais P. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, 414(6860): 169-172.
- [2] De Vries W, Solberg S, Dobbertin M, Sterba H, Laubhahn D, Jan Reinds G, Nabuurs G J, Gundersen P, Sutton M A. Ecologically implausible carbon response? *Nature*, 2008, 451(7180): E1-E3.
- [3] De Vries W, Solberg S, Dobbertin M, Sterba H, Laubhahn D, van Oijen M, Evans C, Gundersen P, Kros J, Wamelink G W W, Reinds G J, Sutton M A. The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration by European forests and heathlands. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(8): 1814-1823.
- [4] Höglberg P. Environmental science: Nitrogen impacts on forest carbon. *Nature*, 2007, 447(7146): 781-782.
- [5] Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M, Berbigier P, Berninger F, Delzon S, Grelle A, Hari P, Jarvis P G, Kolari P, Kowalski A S, Lankreijer H, Law B E, Lindroth A, Loustau D, Manca G, Moncrieff J B, Rayment M, Tedeschi V, Valentini R, Grace J. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature*, 2007, 447(7146): 849-851.
- [6] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777-783.
- [7] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(3): 345-353.
- [8] Bol R, Moering J, Preedy N, Glaser B. Short-term sequestration of slurry-derived carbon into particle size fractions of a temperate grassland soil. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2004, 40(1): 81-87.
- [9] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, Ravankar H N. Long-term effects of NPK fertiliser and manure on soil fertility and a sorghum-wheat farming system. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2007, 47(6): 700-711.
- [10] Jantalia C P, Halvorson A D. Nitrogen Fertilizer Effects on Irrigated Conventional Tillage Corn Yields and Soil Carbon and Nitrogen Pools. *Agronomy Journal*, 2011, 103(3): 871-878.
- [11] Piccolo A, Spaccini R, Nieder R, Richter J. Sequestration of abiologically labile organic carbon in soils by humified organic matter. *Climatic Change*, 2004, 67(2): 329-343.
- [12] Jastrow J D, Amonette J E, Bailey V L. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Climatic Change*, 2007, 80(1): 5-23.
- [13] Zheng D, Lin Z Y, Zhang X Q. Progress in studies of Tibetan Plateau and global environmental change. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 95-102.
- [14] Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H, Ji C J, Zheng C Y, He J S, Zhu B A. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1592-1599.
- [15] Xu X L, Ouyang H, Cao G M, Pei Z Y, Zhou C P. Nitrogen deposition and carbon sequestration in alpine meadows. *Biogeochemistry*, 2004, 71(3): 353-369.
- [16] Zhou X M. *Kobresia humilis* meadow in China (In Chinese). Beijing: Science press, 2001, 1-297.
- [17] Lü C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: Synthesis of observational data. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, D22S05, doi: 10.1029/2006JD007990.
- [18] Carter M R, Parton W J, Rowland I C, Schultz J E, Steed G R. Simulation of soil organic carbon and nitrogen changes in cereal and pasture systems of southern Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 1993, 31(4): 481-491.
- [19] Franzluebbers A J, Stuedemann J A. Particulate and non-particulate fractions of soil organic carbon under pastures in the Southern Piedmont. *Environmental Pollution*, 2002, 116(Supplement 1): S53-S62.

- [20] Wang H J, Ning L M, Xu L X, Huang H, Du J. Vertical Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon Content in an Alpine-cold Zone of Northwest Sichuan. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(1): 76-80.
- [21] Carter M R, Angers D A, Kunelius H T. Soil structural form and stability, and organic matter under cool-season perennial grasses. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(4): 1194-1199.
- [22] Gregorich E G, Monreal C M, Carter M R, Angers D A, Ellert B H. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, 74(4): 367-385.
- [23] Cheng S L, Fang H J, Yu G R, Zhu T H, Zheng J J, Yang X M, Zhang X P, Yu G R. Effects of soil erosion and deposition on soil organic carbon dynamics at a sloping field in Black Soil region, Northeast China. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56(4): 521-529.
- [24] Heitkamp F, Raupp J, Ludwig B. Effects of fertilizer type and rate on labile soil fractions of a sandy Cambisol-long-term and short-term dynamics. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, 174(1): 121-127.
- [25] Zhu T H, Cheng S L, Fang H J, Yu G R, Zheng J J, Li Y N. Early responses of soil CO₂ emission to simulating atmospheric nitrogen deposition in an alpine meadow on the Qinghai Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2687-2696.
- [26] Fang H J, Cheng S L, Yu G R, Zheng J J, Zhang P L, Xu M J, Li Y N, Yang X M. Responses of CO₂ efflux from an alpine meadow soil on the Qinghai Tibetan Plateau to multi-form and low-level N addition. *Plant and Soil*, 2012, 351(1/2): 177-190.
- [27] Quincke J A, Wortmann C S, Mamo M, Franti T, Drijber R A. Occasional tillage of no-till systems: Carbon dioxide flux and changes in total and labile soil organic carbon. *Agronomy Journal*, 2007, 99(4): 1158-1168.
- [28] Setia R, Marschner P, Baldock J, Chittleborough D, Verma V. Relationships between carbon dioxide emission and soil properties in salt-affected landscapes. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(3): 667-674.
- [29] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [30] Weyers S L, Barbour N W, Johnson J M F. Chemical composition of crop biomass impacts its decomposition. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(1): 155-162.
- [31] Zinn Y L, Lal R, Resck DVS. Texture and organic carbon relation described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. *Geoderma*, 2005, 127(1): 168-173.
- [32] Liang A Z, Zhang X P, Yang X M, Shen Y, Shi X H, Fan R Q, Fang H J. Dynamics of soil particulate organic carbon and mineral-incorporated organic carbon in black soils in Northeast China. 2010, 47(1): 153-158.
- [33] Cleveland C C, Neff J C, Townsend A R, Hood E. Composition, Dynamics, and Fate of Leached Dissolved Organic Matter in Terrestrial Ecosystems: Results from a Decomposition Experiment. *Ecosystems*, 2004, 7(3): 275-285.
- [34] Hagedorn F, Maurer S, Bucher J B, Siegwolf R T W. Immobilization, stabilization and remobilization of nitrogen in forest soils at elevated CO₂: a ¹⁵N and ¹³C tracer study. *Global Change Biology*, 2005, 11(10): 1816-1827.
- [35] Michel K, Matzner E, Dignac M F, Kögel-Knabner I. Properties of dissolved organic matter related to soil organic matter quality and nitrogen additions in Norway spruce forest floors. *Geoderma*, 2006, 130(3): 250-264.
- [36] Zhu T H. Early Responses of Soil Carbon and Nitrogen Dynamics and Their Emission Processes to Simulating Atmospheric Nitrogen Deposition in an Alpine Meadow on the Qinghai Tibetan Plateau [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010.

参考文献:

- [13] 郑度,林振耀,张雪芹. 青藏高原与全球环境变化研究进展. *地学前缘*, 2002, 9(1): 95-102.
- [16] 周兴民. 中国高草草甸. 北京: 科学出版社, 2001: 1-297.
- [20] 王华静, 宁龙梅, 徐留兴, 黄慧, 杜鹃. 川西北高寒地区土壤有机碳含量垂直分布特征. *土壤通报*, 2012, 43(1): 76-80.
- [25] 朱天鸿, 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 郑娇娇, 李英年. 青藏高原高寒草甸土壤 CO₂ 排放对模拟氮沉降的早期响应. *生态学报*, 2011, 31(10): 2687-2696.
- [32] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 申艳, 时秀焕, 范如芹, 方华军. 黑土颗粒态有机碳与矿物结合态有机碳的变化研究. *土壤学报*, 2010, 47(1): 153-158.
- [36] 朱天鸿. 青藏高原高寒草甸土壤碳氮动态与排放过程对模拟氮沉降的响应[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.

CONTENTS

Conservation strategies for <i>Ulmus elongata</i> based on the analysis of biological and ecological factors	GAO Jianguo, ZHANG Yi, WU Yuhuan, et al (5287)
Vertical distribution of methanogen community structures in <i>Phragmites australis</i> marsh soil in the Min River estuary	SHE Chenxing, TONG Chuan (5299)
Energy balance closure and its effects on evapotranspiration measurements with the eddy covariance technique in a cropland	LIU Du, LI Jun, YU Qiang, TONG Xiaojuan, et al (5309)
Effects of soil water potential on the growth and physiological characteristics of <i>Populus tomentosa</i> pulpwood plantation under subsurface drip irrigation	XI Benye, WANG Ye, DI Nan, et al (5318)
Physiological indices of leaves of jujube (<i>Zizyphus jujuba</i>) damaged by <i>Apolygus lucorum</i>	GAO Yong, MEN Xingyuan, YU Yi, et al (5330)
Economic analysis of wetland resource protection: a case study of Beijing Wild Duck Lake	WANG Changhai, CUI Lijuan, MA Muyuan, et al (5337)
Comparative studies on the farmers' willingness to accept eco-compensation in wetlands nature reserve	WANG Changhai, CUI Lijuan, MAO Xufeng, et al (5345)
Remote sensing estimation models of <i>Suaeda salsa</i> biomass in the coastal wetland	FU Xin, LIU Gaohuan, HUANG Chong, LIU Qingsheng (5355)
Effects of N addition on soil organic carbon components in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau	ZHENG Jiaojiao, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (5363)
Estimating carbon emissions from forest fires during 2001 to 2010 in Daxing'anling Mountain	HU Haiqing, WEI Shujing, SUN Long (5373)
Predicting the effects of soil water potential on the growth of cut lily	DONG Yongyi, LI Gang, AN Dongsheng, et al (5387)
Rain enrichment-accelerated carbon emissions from soil in a <i>Nitraria sphaerocarpa</i> community in hyperarid region	LIU Dianjun, WU Bo, LI Yonghua, et al (5396)
Response of soil organic carbon sequestration to the "Grain for Green Project" in the hilly Loess Plateau region	XU Mingxiang, WANG Zheng, ZHANG Jin, et al (5405)
Temporal and spatial variability in soil respiration in five temperate forests in Xiaoxing'an Mountains, China	SHI Baoku, JIN Guangze, WANG Zhaoyang (5416)
Distributions pattern of phosphorus, potassium and influencing factors in the upstream of Shule river basin	LIU Wenjie, CHEN Shengyun, HU Fengzu, et al (5429)
COI1 is involved in jasmonate-induced indolic glucosinolate biosynthesis in <i>Arabidopsis thaliana</i>	SHI Lu, LI Mengsha, WANG Lihua, et al (5438)
Modeling canopy rainfall interception of a replanted <i>Robinia pseudoacacia</i> forest in the Loess Plateau	WANG Yanping, WANG Li, WEI Sanping (5445)
The differences of plant community diversity among the different altitudes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	LIU Weiwei, WANG Jie, WANG Yong, et al (5454)
Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing	SU Hongxin, LI Guangqi (5467)
Response of upland jujube tree trunk diameter to different ecological factors	ZHAO Ying, WANG Youke, HAN Lixin, et al (5476)
The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a young <i>Caragana korshinskii</i> plantation	ZHANG Fan, CHEN Jianwen, WANG Mengben (5484)
Interspecific segregation of species in tree and shrub layers of the <i>Pinus bungeana</i> Zucc. ex Endl. community in the Wulu Mountains, Shanxi Province, China	WANG Lili, BI Runcheng, YAN Ming, et al (5494)
Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season	MA Xiaoxia, WANG Lianlian, LI Qinghui, et al (5502)
A model to predict dry matter accumulation dynamics in wheat based on the normalized method	LIU Juan, XIONG Shuping, YANG Yang, et al (5512)
Optimization strategies and an aesthetic evaluation of typical plant communities in the Shanghai Green Belt	ZHANG Kaixuan, LING Huanran, DA Liangjun (5521)
Carbon footprint evaluation research on the tourism transportation system at tourist attractions; a case study in Hengshan	DOU Yindi, LIU Yunpeng, LI Bohua, et al (5532)
An urban ecosystem assessment method and its application	SHI Huichun, LIU Wei, HE Jian, et al (5542)
Seasonal variations in distribution and biological characteristics of snailfish <i>Liparis tanakae</i> in the central and southern Yellow Sea	ZHOU Zhipeng, JIN Xianshi, SHAN Xiujuan, et al (5550)
Effects of cyanobacterial accumulation and snail grazing on the growth of <i>vallisneria natans</i>	HE Hu, HE Yuhong, JI Yachan, et al (5562)
The structure and thermal insulation capability of <i>Mustela sibirica manchurica</i> winter pelage in Heilongjiang Province	LIU Yu, ZHANG Wei (5568)
Ontogenetic shifts in selected body temperature and thermal tolerance of the tiger frog, <i>Hoplobatrachus chinensis</i>	FAN Xiaoli, LEI Huanzong, LIN Zhihua (5574)
The influence of tubificid worms bioturbation on organic phosphorus components and their vertical distribution in sediment of Lake Taihu	BAI Xiuling, ZHOU Yunkai, ZHANG Lei (5581)
Review and Monograph	
Research advances in ecological assessment of urban greenspace	MAO Qizheng, LUO Shanghua, MA Keming, et al (5589)
Ecological hot topics in global change on the 2 nd International Young Ecologist Forum	WAN Yun, XU Lili, GENG Qifang, et al (5601)
Scientific Note	
Screening trial for the suitable plant species growing on sand dunes in the alpine valley and its recovery status in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China	SHEN Weishou, LI Haidong, LIN Naifeng, et al (5609)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

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 32 卷 第 17 期 (2012 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 17 (September, 2012)

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	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
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



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