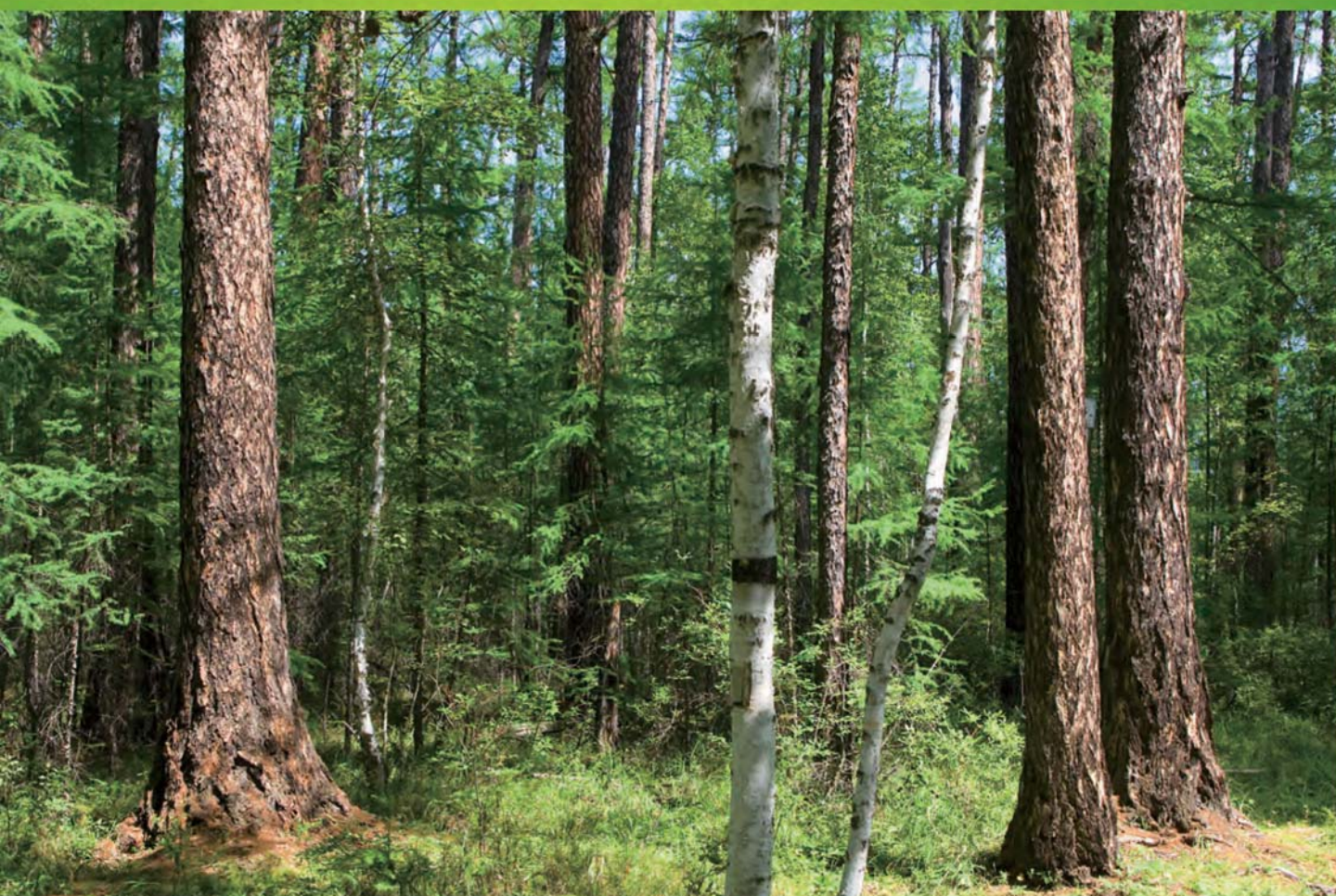


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

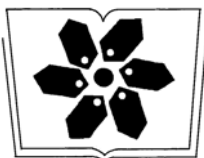
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第23期 Vol.33 No.23 **2013**

中国生态学会
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 33 卷 第 23 期 2013 年 12 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 基于树干液流技术的北京市刺槐冠层吸收臭氧特征研究..... 王 华, 欧阳志云, 任玉芬, 等 (7323)
- 三疣梭子蟹增殖过程对野生种群的遗传影响——以海州湾为例..... 董志国, 李晓英, 张庆起, 等 (7332)
- 土壤盐分对三角叶滨藜抗旱性能的影响..... 谭永芹, 柏新富, 侯玉平, 等 (7340)
- 南美斑潜蝇为害对黄瓜体内 4 种防御酶活性的影响..... 孙兴华, 周晓榕, 庞保平, 等 (7348)

个体与基础生态

- 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物养分输入量的早期影响..... 肖银龙, 涂利华, 胡庭兴, 等 (7355)
- 茎瘤芥不同生长期植株营养特性及其与产量的关系..... 赵 欢, 李会合, 吕慧峰, 等 (7364)
- 雷竹覆盖物分解速率及其硅含量的变化..... 黄张婷, 张 艳, 宋照亮, 等 (7373)
- 渍水对油菜苗期生长及生理特性的影响..... 张树杰, 廖 星, 胡小加, 等 (7382)
- 广西扶绥黑叶猴的主要食源植物及其粗蛋白含量..... 李友邦, 丁 平, 黄乘明, 等 (7390)
- 氮素营养水平对膜下滴灌玉米穗位叶光合及氮代谢酶活性的影响..... 谷 岩, 胡文河, 徐百军, 等 (7399)
- PFOS 对斑马鱼胚胎及仔鱼的生态毒理效应 夏继刚, 牛翠娟, 孙麓垠 (7408)
- 浒苔干粉末提取物对东海原甲藻和中肋骨条藻的克生作用..... 韩秀荣, 高 嵩, 侯俊妮, 等 (7417)
- 基于柑橘木虱 CO I 基因的捕食性天敌捕食作用评估 孟 翔, 欧阳革成, Xia Yulu, 等 (7430)
- 健康和虫害的红松挥发物对赤松梢斑螟及其寄生蜂寄主选择行为的影响.....
..... 王 琪, 严善春, 严俊鑫, 等 (7437)

种群、群落和生态系统

- 小麦蚕豆间作对蚕豆根际微生物群落功能多样性的影响及其与蚕豆枯萎病发生的关系.....
..... 董 艳, 董 坤, 汤 利, 等 (7445)
- 喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力变化特征..... 于 扬, 杜 虎, 宋同清, 等 (7455)
- 黄土高原人工苜蓿草地固碳效应评估..... 李文静, 王 振, 韩清芳, 等 (7467)

景观、区域和全球生态

- 粉垄耕作对黄淮海北部土壤水分及其利用效率的影响..... 李轶冰, 逢焕成, 杨 雪, 等 (7478)
- 三峡库区典型农林流域景观格局对径流和泥沙输出的影响..... 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 等 (7487)
- 基于 BP 神经网络与 ETM+ 遥感数据的盐城滨海自然湿地覆被分类..... 肖锦成, 欧维新, 符海月 (7496)
- 寒温带针叶林土壤 CH₄ 吸收对模拟大气氮沉降增加的初期响应..... 高文龙, 程淑兰, 方华军, 等 (7505)
- 寒温带针叶林土壤呼吸作用的时空特征..... 贾丙瑞, 周广胜, 蒋延玲, 等 (7516)

黄土高原小麦田土壤呼吸季节和年际变化..... 周小平,王效科,张红星,等 (7525)

不同排放源周边大气环境中 NH₃ 浓度动态..... 刘杰云,况福虹,唐傲寒,等 (7537)

施加秸秆和蚯蚓活动对麦田 N₂O 排放的影响 罗天相,胡 锋,李辉信 (7545)

资源与产业生态

基于水声学方法的天目湖鱼类资源捕捞与放流的生态监测..... 孙明波,谷孝鸿,曾庆飞,等 (7553)

应用支持向量机评价太湖富营养化状态..... 张成成,沈爱春,张晓晴,等 (7563)

研究简报

亚热带 4 种森林凋落物量及其动态特征 徐旺明,闫文德,李洁冰,等 (7570)

青蒿素对蔬菜种子发芽和幼苗生长的化感效应 白 祯,黄 玥,黄建国 (7576)

NO 参与 AM 真菌与烟草共生过程 王 玮,赵方贵,侯丽霞,等 (7583)

基于核密度估计的动物生境适宜度制图方法..... 张桂铭,朱阿兴,杨胜天,等 (7590)

施氮方式对转基因棉花 Bt 蛋白含量及产量的影响 马宗斌,刘桂珍,严根土,等 (7601)

学术信息与动态

未来地球——全球可持续性研究计划..... 刘源鑫,赵文武 (7610)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 292 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 33 * 2013-12



封面图说：兴安落叶松林景观——中国的寒温带针叶林属于东西伯利亚森林向南的延伸部分,它是大兴安岭北部一带的地带性植被类型,一般可分为落叶针叶林和常绿针叶林两类。兴安落叶松林景观地下部分为棕色森林土,中上部为灰化棕色针叶林土,均呈酸性反应。随着全球气候持续变暖,寒温带针叶林生态系统潜在的巨大碳库将可能成为大气 CO₂ 的重要来源,研究表明,温度是寒温带针叶林生态系统土壤呼吸作用的主要调控因子,对温度的敏感性随纬度升高而增加,根系和凋落物与土壤呼吸作用表现出相似的空间变异性。

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

DOI: 10.5846/stxb201209101276

李文静,王振,韩清芳,任曾辉,闫明科,张鹏,贾志宽,杨宝平.黄土高原人工苜蓿草地固碳效应评估.生态学报,2013,33(23):7467-7477.

Li W J, Wang Z, Han Q F, Ren C H, Yan M K, Zhang P, Jia Z K, Yang B P. Evaluation on carbon sequestration effects of artificial alfalfa pastures in the Loess Plateau area. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7467-7477.

黄土高原人工苜蓿草地固碳效应评估

李文静^{1,2}, 王 振^{1,2}, 韩清芳^{1,2,*}, 任曾辉^{1,2}, 闫明科^{1,2}, 张 鹏¹,
贾志宽^{1,2}, 杨宝平^{1,2}

(1. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院 / 农业部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室, 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学农学院, 杨凌 712100)

摘要: 苜蓿草地作为黄土高原草地的重要组成部分,在黄土高原草地生态系统碳循环中占有重要地位。同时由于苜蓿具有固氮和固碳的双重作用,使它在低碳农业的发展中具有重要意义。以 1 年生(建植初期)、3 年生(盛产期)、5 年生(稳产期)和 10 年生(衰败期)的人工苜蓿草地为研究对象,利用地上地下生物量和土壤碳储量,定量分析了人工苜蓿草地不同发育阶段的固碳能力;结合种植面积,对黄土高原区人工苜蓿草地的总固碳效应进行了评价。研究结果表明:苜蓿草地地上生物固碳能力以 3 年生和 5 年生最强,并显著高于其他年限;地下生物固碳和土壤固碳量均以 10a 苜蓿草地最高,且显著高于其他年限。总体而言,人工苜蓿草地以土壤固碳为主,并集中在 0—80cm 土壤,各年限 0—80cm 土层土壤固碳量分别占到总固碳量的 41.02%、39.43%、41.56%、39.59%;而地下生物固碳主要发生在 0—20cm 土层,各年限该层生物固碳量分别占到地下生物总固碳量的 45.74%、55.68%、53.12%和 43.28%。苜蓿草地在整个生命周期中总固碳量随生长年限逐年增长,但增长速度不明显,各年限单位面积总固碳量分别为 12.69、13.49、13.31 kg/m²和 14.83 kg/m²。估算得到黄土高原的人工苜蓿草地年总固碳量为 1.430×10¹¹ kg(143.0 Tg),其中地上、地下、土壤分别为 5.43、1.15Tg 和 136.4Tg。研究结果为正确分析区域碳循环和发展低碳大农业提供了重要理论参考。

关键词: 黄土高原;人工苜蓿草地;发育阶段;固碳;空间特征

Evaluation on carbon sequestration effects of artificial alfalfa pastures in the Loess Plateau area

LI Wenjing^{1,2}, WANG Zhen^{1,2}, HAN Qingfang^{1,2,*}, REN Cenghui^{1,2}, YAN Mingke^{1,2}, ZHANG Peng¹, JIA Zhikuan^{1,2}, YANG Baoping^{1,2}

1 Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest Agriculture and Forestry University/Key Laboratory of Crop Physi-ecology and Tillage in Northwestern Loess Plateau, Minister of Agriculture, Yangling 712100, China

2 College of Agronomy, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: Carbon of grasslands is an important component in the global carbon cycle and often plays a dominant role in continental and regional carbon budgets. Identifying Carbon dynamics in grassland ecosystems is significant to predict the response of grassland ecosystems to future climate change. As the important component of the grasslands on Loess Plateau, alfalfa pastures which have both effects of nitrogen fixation and carbon sequestration, not only have great influences on the carbon cycle of the grasslands on Loess Plateau, but also play a significant role in low carbon agriculture. However, the carbon sequestration effects of alfalfa pastures on Loess Plateau are poorly understood. This research studied the carbon

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2012BAD09B09);高等学校学科创新引智计划资助项目(B12007);陕西科技创新资助项目(2010NKC-03, 2011NXC01-16);西北农林科技大学基本科研业务费资助项目(CX200902)

收稿日期: 2012-09-10; **修订日期:** 2013-06-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hanqf88@nwsuaf.edu.cn

sequestration effects of alfalfa pastures which have grown one year (initial stage of establishment), three years (high yielding period), five years (stable production period) and ten years (obviously decline phase). With measuring the carbon content of the above-ground vegetation, below-ground vegetation, and soil, the research quantitatively analysed the carbon sequestration effects of alfalfa pastures with different planting ages, meanwhile, evaluated the carbon sequestration effects of the alfalfa pastures on Loess Plateau. The results showed that alfalfa pastures with the growth of 3 and 5 years owned the strongest ability of above-ground vegetation carbon sequestration, while the 10-year-old had the highest ability of carbon sequestration of both below-ground vegetation and soil. The soil carbon sequestration focused on 0—80 cm soil layer, while the below-ground vegetation focused on 0—20 cm. The soil carbon sequestration amount of 0—80 cm soil layer of different planting ages accounted for 41.02%, 39.43%, 41.56% and 39.59% of their total soil carbon sequestration amount respectively whilst the below-ground vegetation occupied 45.74%, 55.68%, 53.12% and 43.28% respectively. The total fixed carbon amounts of alfalfa pastures were growing with the increase of planting age, but the rate was not very obvious, and the total fixed carbon amount per unit area of different planting ages were 12.69 kg/m², 13.49 kg/m², 13.31 kg/m² and 14.83 kg/m² respectively. According to the age structure of alfalfa pastures on Loess Plateau, we estimated that the yearly total fixed carbon of alfalfa pastures on Loess Plateau was 1.430×10^{11} kg (143.0 Tg). This study provided theory references for regional studies of carbon cycles and low carbon agriculture.

Key Words: the Loess Plateau; artificial alfalfa pastures; developmental stages; carbon sequestration; spatial characteristics

温室气体引起的全球变暖是 21 世纪人类生存环境面对的巨大挑战, 如何应对气候变化, 实现可持续发展, 是目前世界各国重点关注的问题。陆地生态系统作为人类的居住环境和人类活动的主要场所, 其碳贮存量约为大气碳库的 2 倍^[1], 是全球碳循环的重要组成部分, 因此探究陆地生态系统碳循环的动态机制对全面理解全球碳循环、正确预测未来气候变化具有重要意义。

作为陆地生态系统重要的组成部分, 森林、草地、农田等生态系统的碳汇作用是增加碳蓄积量行之有效的办法^[2]。森林作为陆地生态系统最大的碳库^[2], 当前对其碳循环已开展了众多研究, 从总体上对我国森林碳储量进行了估算和潜力分析^[3-5], 而且对不同区域和不同尺度的森林碳储量和碳循环机制也进行了研究^[6-10]。对于农田生态系统的碳循环展开的研究多集中在分析农田土壤有机碳含量变化^[11-14], 以及耕作方式、种植制度等栽培措施对农田碳排放的影响^[15-19]。草地生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分, 在陆地生态系统碳循环中占十分重要的地位。据统计, 我国现有不同类型草地面积约 4 亿 m², 约占我国土地总面积的 40% 以上, 其面积约为我国耕地面积的 4 倍, 森林面积的 3.6 倍, 是我国陆地最大的生态系统^[20]。进行草地生态系统的碳库及其年际变化的准确评估, 对正确评估我国陆地生态系统碳循环具有重要意义。当前众多学者对我国草地碳储量进行了研究^[20-25]。方精云等^[21]综合当前中国草地碳库的研究进展, 研究认为中国草地生物量碳密度在 215.8—348.1 g C/m² 之间波动, 土壤有机碳密度一般不会超过 8.5 kg C/m², 草地生态系统碳库约为 29.1 Pg C。Ni 等^[22]应用 Olson 等的碳密度数据估算了中国草地的总碳储量为 44.09 Pg, 其中植被层为 3.06 Pg, 土壤层为 41.03 Pg。钟华平等^[24]研究认为, 草原中土壤碳主要集中于 0—20 cm 的表层土壤中。刘伟等^[26]分析了不同草地类型土壤有机碳的分布特征及其影响因素, 并认为在 0—100 cm 土层深度内, 0—20 cm 土壤有机碳含量与其他土层差异显著。程积民等^[27-28]通过对植物活体、凋落物和根系密度研究认为, 黄土高原不同植被类型草地碳密度存在显著差异。由于资料来源和估算方法不同, 得到的碳储量有所差异。针对不同区域的草地生态系统碳储量学者也展开了许多研究^[26-31], 进一步加深了对中国草地生态系统碳储量的认识。

在全球气候变暖的背景下, 保护草地资源, 合理开发草业, 是发展低碳农业的一个重要途径^[32]。苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 作为一种优良的豆科多年生牧草, 在世界范围广为种植, 且一直被作为我国人工草地建设的首选草种。苜蓿能够持续高产, 通过其自身地上有机体固定大量的大气 CO₂, 并且以根瘤菌和大量的根

系给土壤留下丰富的腐殖质来增加土壤有机质含量,种植苜蓿具有显著的土壤固碳效应^[33]。黄土高原是我国草地的重要分布区域,苜蓿草地作为黄土高原重要的草地生态系统,其碳储量的研究对黄土高原草地生态系统碳储量的评估以及区域大农业生产的固碳减排具有重要意义,但当前对其碳储量的研究较少。本研究通过对不同年限的苜蓿草地地上生物量、地下不同空间根系和土壤固碳量特征进行分析,对不同年限苜蓿草地的固碳效应作出评价,并对整个黄土高原苜蓿草地的固碳效应进行估算,对科学建植和合理利用草地资源,发展区域低碳大农业具有重要的理论意义与实践参考价值。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验设置在西北农林科技大学农作试验一站(北纬 34°21',东经 108°10',海拔 454.8m),该站位于秦岭北麓、渭河平原西部的头道塬上,平均日照时数 2150h,年平均气温 12—14℃,极端最低气温-21—-15℃,年平均降水量 580.5mm,春季降雨偏少,雨量主要集中在 7、8、9 三个月,属暖温带半湿润易旱气候。试验地土壤为壤土,土层深厚,通气良好。研究选取 1 年生、3 年生、5 年生和 10 年生 4 个不同生长年限的紫花苜蓿草地,苜蓿品种为巨人 201,不同年限草地均为秋播,播种量 7.5 kg/hm²,行距 30 cm,田间管理条件相同,从建植开始均不施肥和灌溉,适时人工除草和喷洒农药。每个年限苜蓿草地种植面积 234m²(18m×13m)。

1.2 取样及分析方法

1.2.1 生物量测定和土壤取样

地上生物量 分别于 5 月 18—19 日、6 月 22—23 日、8 月 11—12 日和 10 月 28—29 日对各年限四茬苜蓿初花期测定其产草量。取样方面积 2.0 m²,齐地刈割,称鲜重,重复 3 次。取鲜样 600g 左右于 105℃杀青 15 min,65℃烘干 24 h 至恒重,计算苜蓿的鲜干比,换算干草产量,并留取烘干样品备作植物碳测定用。

土壤及根系 使用内径 7.9 cm(钻头筒径高 12cm)的根钻同时对土壤和地下生物量进行取样,取样时间为 11 月 4—5 日。1、3、5、10a 各年限苜蓿地均随机选取 3 个重复,每个重复 20 cm 分层,0—300 cm 土层分为 15 层,从苜蓿行中向行间依次相邻各取 3 点土样混合,每层土样总体积为 2939.4 cm³,记为 V_i 。先分离出其中体积较大的可见根段水洗干净后阴干,称重记为 m_c 。将土样带回实验室过孔径 1 mm 的土筛水洗出细根,阴干,称重记为 m_x ,总地下生物质量为 $m_z = m_c + m_x$ 。收集洗出的土样 1.5 kg 左右,室内阴干。土样和根样均留作碳含量测定用。

1.2.2 碳含量测定

将土样磨细,过 1.0 mm 筛,风干;根样和地上部植物样粉碎、磨细,过 0.15 mm 筛,烘干。采用重铬酸钾油浴外加热法分别测定其碳含量。试验中土样取 0.5 g,植物样均取 0.015 g,以石英砂作为对照。

1.2.3 数据处理

对所测定的数据采用 Excel 处理后,利用 SAS8.0 软件进行平均值、标准差和方差分析,采用 Duncan 新复极差法进行差异显著性检验,数据为平均值±标准差($n=3$),显著性水平为 $P=0.05$ 。

2 结果分析

2.1 不同年限苜蓿草地地上生物固碳量

不同年限苜蓿草地地上生物量差异显著,但各年限苜蓿地上植株含碳量无显著差异(表 1)。苜蓿生长第

表 1 不同年限苜蓿草地地上生物年固碳量

Table 1 Carbon sequestration amount of above-ground vegetation of alfalfa pastures with different planting ages

年限(编号) Planting age (Code)	生物产量/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹) Biological yield	含碳量/(g/kg) Carbon content	单位面积固碳量/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹) Carbon sequestration amount per unit area
1 年生(Y1) Annual	7750.6±40.1d	407.7±14.60	3159.9±128.6c
3 年生(Y3) Triennial	14417.6±21.9a	407.7±12.61	5877.8±173.7a
4 年生(Y5) Five-year-old	13841.5±33.0b	414.53±12.73	5737.5±162.7a
10 年生(Y10) Ten-year-old	9905.2±36.8c	400.53±18.25	3967.3±128.6b

3 年进入盛产期,地上生物产量显著高于其他年限,5 年生苜蓿处于稳产期,地上生物量次之,1 年生生物产量显著低于其他年限。根据地上生物量和植株含碳量计算,3 年生和 5 年生苜蓿单位面积植株固碳量都处于最高水平,且二者无显著差异,10 年生苜蓿已处于衰败期,其地上生物产量和植株固碳量都有所下降,导致其单位面积植株固碳量较 3 年生和 5 年生明显降低。

2.2 不同年限苜蓿草地地下生物固碳量

2.2.1 不同年限苜蓿草地地下生物含碳量

同一年限不同土层深度苜蓿地下生物含碳量存在差异(表 2),1 年生在 140—160 cm 含碳量高,3 年生在 160—260 cm 土层深度内地下生物含碳量都较其他土层深度高,5 年生在 140—300 cm 土层深度内含碳量也都处于较高水平。10 年生碳含量各土层深度内虽无显著差异,但在 140—160 cm 土层深度内含碳量也处于较高水平,说明 140—160 cm 土层深度内各年限地下生物固碳能力都较强。

同一土层深度,不同年限苜蓿地下生物含碳量也有差异。在 0—160 cm 土层深度内,10 年生含碳量基本处于最高水平,且在 60—80 cm 土层深度内显著高于其它各年限($P<0.05$);1 年生含碳量始终处于最低水平,且在 20—40 cm 土层深度内显著低于其他年限($P<0.05$);3 年生和 5 年生含碳量在 0—160 cm 土层深度内差异不显著。160—200 cm,3 年生和 5 年生含碳量较高,1 年生含碳量仍最低,且在 180—200 cm 土层深度显著低于其它各年限($P<0.05$)。200—300 cm 土层深度内,1 年生苜蓿几乎不见地下生物,3 年生和 5 年生含碳量仍处于较高水平,且在 240—260 cm 土层深度内显著高于 10 年生含碳量($P<0.05$)。

表 2 不同年限苜蓿草地不同土层深度地下生物含碳量

Table 2 Below-ground vegetation carbon content of alfalfa pastures with different planting ages

土层深度 Soil depth/cm	地下生物含碳量 Root carbon content/(g/kg)			
	Y1	Y3	Y5	Y10
0—20	247.77±16.14 ^{abcd}	305.08±61.49 ^{abc}	277.13±28.50 ^d	339.20±17.86 ^{ab}
20—40	196.12±28.22 ^d	300.45±37.58 ^{abc}	284.34±44.92 ^{cd}	341.82±14.59 ^{ab}
40—60	228.46±54.98 ^{abcd}	232.03±45.24 ^d	304.93±48.93 ^{cd}	260.03±110.55 ^{ab}
60—80	276.28±37.54 ^{ab}	253.37±33.11 ^{bcd}	298.11±10.95 ^{cd}	363.89±23.29 ^b
80—100	238.52±14.22 ^{abcd}	240.76±79.59 ^{cd}	301.41±37.82 ^{cd}	322.39±68.65 ^{ab}
100—120	222.55±46.36 ^{bcd}	294.62±16.51 ^{abcd}	272.30±15.20 ^d	335.39±16.87 ^{ab}
120—140	244.87±23.46 ^{abcd}	305.45±9.46 ^{abc}	286.70±50.62 ^{cd}	294.88±59.65 ^{ab}
140—160	292.31±14.69 ^a	292.63±23.01 ^{abcd}	307.98±60.14 ^{bcd}	342.83±9.48 ^{ab}
160—180	264.71±20.58 ^{abc}	319.28±33.39 ^{ab}	331.73±26.58 ^{abcd}	277.56±92.49 ^{ab}
180—200	209.52±3.65 ^{cd}	322.74±33.45 ^{ab}	345.36±43.67 ^{abc}	316.82±20.62 ^{ab}
200—220	—	316.72±10.85 ^{ab}	290.90±6.19 ^{cd}	296.91±79.46 ^{ab}
220—240	—	302.75±16.11 ^{abc}	270.14±14.68 ^d	343.05±10.98 ^{ab}
240—260	—	324.32±21.71 ^a	326.10±33.66 ^{ab}	256.30±15.14 ^b
260—280	—	312.68±1.72 ^{ab}	347.54±11.66 ^{abc}	280.52±32.05 ^{ab}
280—300	—	302.00±14.67 ^{abc}	384.88±11.51 ^a	304.75±67.37 ^{ab}

上标不同字母代表同一年限苜蓿草地不同深度地下生物含碳量差异显著($P<0.05$),下标不同字母代表同一土层深度内不同年限苜蓿草地地下生物含碳量差异显著($P<0.05$);“—”表示该土层深度内未收集到明显的地下生物

2.2.2 不同年限苜蓿草地地下生物量

各年限苜蓿草地 0—300 cm 土层深度单位体积内地下生物量比较可看出(表 3),各年限苜蓿地下生物均主要分布在 0—100 cm 土层内,且 0—20 cm 土层分布最多,分别占 0—300 cm 总量的 43.64%、52.99%、55.14%和 40.59%。100—300 cm 土层深度内,同一年限不同土层间苜蓿地下生物分布量差异不大。

在不同土层深度内,不同年限地下生物量基本都以 10 年生分布最多,3 年生次之,1 年生始终处于最低水平,10 年生地下生物质量在 40—60 cm、80—120 cm、140—180 cm 和 200—220 cm 土层深度内显著高于其他年限($P<0.05$)。

表 3 不同年限苜蓿草地单位体积地下生物质量/(kg/m³)

Table 3 Below-ground biomass of alfalfa pastures with different planting ages per unit volume

土层深度 Soil depth/cm	Y1			Y3			Y5			Y10		
	XR	CR	ZR	XR	CR	ZR	XR	CR	ZR	XR	CR	ZR
0—20	0.311	0.061	0.372±0.077 ^a	0.676	0.547	1.223±0.029 ^a	0.576	0.101	0.677±0.166 ^a	0.744	0.380	1.124±0.096 ^a
20—40	0.087	0.043	0.130±0.039 ^b	0.051	0.041	0.092±0.033 ^{cd}	0.055	0.041	0.096±0.035 ^b	0.094	0.072	0.166±0.016 ^d
40—60	0.044	0.049	0.093±0.024 ^{bc}	0.078	0.107	0.185±0.040 ^c	0.053	0.023	0.076±0.008 ^b	0.086	0.394	0.480±0.059 ^b
60—80	0.032	0.046	0.078±0.042 ^{bcd}	0.031	0.279	0.310±0.058 ^b	0.060	0.018	0.078±0.039 ^b	0.067	0.079	0.146±0.007 ^d
80—100	0.032	0.026	0.058±0.025 ^{cd}	0.024	0.100	0.124±0.014 ^{cd}	0.025	0.024	0.049±0.027 ^b	0.207	0.049	0.256±0.026 ^c
100—120	—	0.037	0.037±0.008 ^{cd}	0.011	0.044	0.055±0.005 ^d	0.026	0.008	0.034±0.001 ^b	0.079	0.007	0.086±0.003 ^c
120—140	—	0.024	0.024±0.008 ^d	—	0.030	0.030±0.004 ^d	0.029	0.018	0.047±0.016 ^{ab}	0.040	0.010	0.050±0.006 ^c
140—160	—	0.024	0.024±0.013 ^d	—	0.033	0.033±0.004 ^d	—	0.019	0.019±0.004 ^b	0.043	0.010	0.053±0.013 ^c
160—180	—	0.017	0.017±0.007 ^d	—	0.032	0.032±0.005 ^d	—	0.014	0.014±0.005 ^b	0.045	0.038	0.083±0.017 ^c
180—200	—	0.020	0.020±0.004 ^d	—	0.038	0.038±0.007 ^d	—	0.019	0.019±0.006 ^b	0.031	0.007	0.038±0.012 ^c
200—220	—	—	—	—	0.032	0.032±0.005 ^d	—	0.016	0.016±0.001 ^b	0.070	0.012	0.082±0.009 ^c
220—240	—	—	—	—	0.042	0.042±0.009 ^d	—	0.054	0.054±0.029 ^b	0.073	0.005	0.078±0.009 ^c
240—260	—	—	—	—	0.039	0.039±0.003 ^d	—	0.021	0.021±0.008 ^b	0.048	0.001	0.049±0.007 ^c
260—280	—	—	—	—	0.039	0.039±0.001 ^d	—	0.017	0.017±0.004 ^b	0.047	0.001	0.048±0.007 ^c
280—300	—	—	—	—	0.033	0.033±0.003 ^d	—	0.010	0.010±0.007 ^b	0.016	0.013	0.029±0.002 ^c

XR 代表细根,CR 代表粗根,ZR 代表总根;上标不同字母代表同一年限苜蓿草地不同深度地下生物质量差异显著($P<0.05$),下标不同字母代表同一土层深度内不同年限苜蓿草地地下生物质量差异显著($P<0.05$);“—”表示该土层深度内未收集到明显的地下生物

2.2.3 不同年限苜蓿草地地下生物固碳量

根据不同土层地下生物含碳量和生长量,计算各年限不同土层深度的地下生物固碳量(图 1)。不同年限苜蓿草地 0—300cm 土层深度地下生物固碳量差异显著。由于 10 年生苜蓿地下生物含碳量和分布量都较高,在 0—300cm 土层深度内地下生物固碳量基本处于最高水平,且在 20—60cm、80—120cm、140—180cm 和 200—240cm 土层内显著高于其他年限($P<0.05$),3 年生次之,1 年生始终处于最低水平。

同一年限的苜蓿草地,在不同土层深度内地下生物固碳量均以 0—20 cm 最高,1 年生、3 年生、5 年生、10 年生苜蓿 0—20 cm 土层地下生物固碳量分别占到地下生物 0—300 cm 固碳量的 45.74%、55.68%、53.12% 和 43.28%,各年限 0—300cm 土层深度内单位面积地下生物固碳量分别为 39.98、131.66、69.51 g/m² 和 175.67 g/m²,10 年生显著高于其他年限。

2.3 不同年限苜蓿草地土壤固碳量

2.3.1 不同年限苜蓿草地土壤含碳量

对各年限苜蓿草地每 20 cm 土层土壤含碳量进行分析的结果表明(表 4),在 0—80 cm 土层各年限苜蓿草地土壤含碳量无显著差异。80—180 cm 土层深度内,10 年生苜蓿地土壤含碳量始终处于最高水平,3 年生次之,5 年生和 1 年生在 80—100cm、120—140cm 和 140—160 cm 土层深度内均显著高于其它年限($P<0.05$)。180—300 cm 土层深度各年限土壤含碳量差异不显著。

同一年限苜蓿草地,不同土层深度内土壤含碳量均以 0—20 cm 土层最高,且显著高于其它土层($P<$

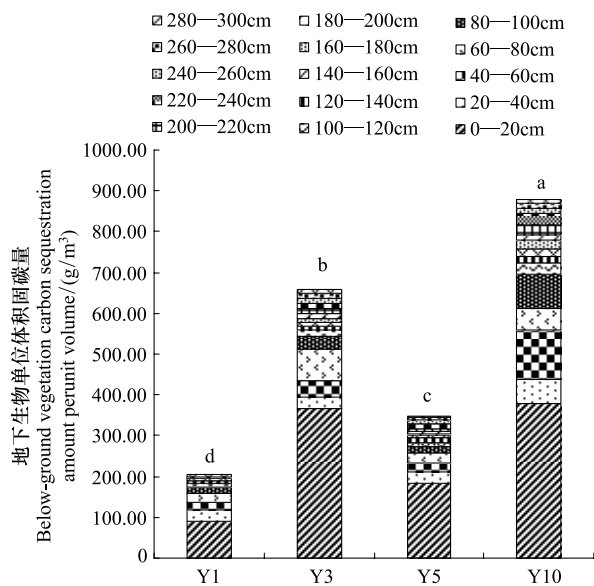


图 1 不同年限苜蓿草地不同土层深度地下生物固碳量

Fig.1 Below-ground vegetation carbon sequestration amount of alfalfa pastures with different planting ages in different soil layers

0.05)。0—160 cm 土层深度内,土壤含碳量基本随着土层深度的增加而降低,160 cm 以下土层深度内土壤含碳量差异不显著。

表 4 不同年限苜蓿草地土壤含碳量

Table 4 Soil carbon content of alfalfa pastures with different planting ages

土层深度 Soil depth/cm	土壤含碳量 Soil carbon content/(g/kg)			
	Y1	Y3	Y5	Y10
0—20	7.28±0.40 ^a	6.77±0.19 ^a	7.47±1.40 ^a	7.36±0.16 ^a
20—40	3.92±0.57 ^b	3.97±0.37 ^b	4.28±0.79 ^b	4.18±0.26 ^b
40—60	3.39±0.22 ^c	3.52±0.36 ^{bc}	3.52±0.23 ^{bc}	4.39±0.58 ^b
60—80	3.35±0.23 ^c	3.55±0.35 ^{bc}	3.40±0.43 ^{cd}	4.03±0.57 ^{bc}
80—100	2.47±0.12 ^{de}	3.01±0.59 ^{cd}	2.67±0.26 ^{cde}	3.86±0.18 ^{bcd}
100—120	2.37±0.20 ^e	2.93±0.42 ^{cd}	2.50±0.19 ^{bc}	3.42±0.18 ^{cde}
120—140	2.38±0.14 ^e	2.68±0.40 ^d	2.38±0.32 ^e	3.37±0.23 ^{cde}
140—160	2.44±0.27 ^{de}	2.57±0.24 ^d	2.43±0.17 ^e	3.21±0.14 ^{def}
160—180	2.35±0.09 ^{ab}	2.98±0.57 ^{cd}	2.27±0.16 ^e	3.01±0.27 ^{efg}
180—200	2.49±0.21 ^{de}	2.65±0.62 ^d	2.29±0.18 ^e	2.82±0.25 ^{efg}
200—220	2.55±0.11 ^{de}	2.65±0.17 ^d	2.63±0.10 ^{de}	2.67±0.47 ^{fg}
220—240	2.66±0.15 ^{de}	2.71±0.12 ^d	2.83±0.10 ^{cde}	2.89±0.04 ^{efg}
240—260	2.71±0.24 ^{de}	2.53±0.04 ^d	2.87±0.08 ^{cde}	2.64±0.12 ^{fg}
260—280	2.62±0.02 ^{de}	2.47±0.06 ^d	2.66±0.11 ^{cde}	2.49±0.10 ^g
280—300	2.91±0.30 ^d	2.49±0.17 ^d	2.90±0.08 ^{cde}	2.53±0.28 ^{fg}

上标不同字母代表同 1 年限苜蓿草地不同深度土壤含碳量差异显著 ($P<0.05$), 下标不同字母代表同一土层深度不同年限苜蓿草地土壤含碳量差异显著 ($P<0.05$)

2.3.2 不同年限苜蓿草地土壤固碳量

根据不同土层土壤容重^[34](表 5), 计算各年限苜蓿草地土壤单位体积固碳量如图 2。不同年限苜蓿草地在 0—80cm 土层深度内土壤固碳量无显著差异, 但在 80—180cm 土层深度内差异较大, 其中 10 年生始终处于最高水平, 3 年生次之, 5 年生和 1 年生无显著差异, 且 10 年生在 80—100cm、120—160cm 土层深度内土壤固碳量显著高于其它年限 ($P<0.05$)。

表 5 不同土层深度土壤容重

Table 5 Soil bulk density at different soil depth

土层深度/cm Soil depth	0—20	20—40	40—60	60—80	80—100	100—120	120—140	140—160	160—180	180—200
土壤容重/(g/cm ³) Soil bulk density	1.34	1.47	1.46	1.44	1.41	1.36	1.28	1.37	1.29	1.27

200—300 cm 土层深度土壤容重取 180—200 cm 土层深度的值

同一年限不同土层深度的土壤固碳量的分析表明, 各年限苜蓿草地土壤固碳量均以 0—20 cm 最高, 且均显著高于其他土层固碳量 ($P<0.05$), 这主要是由于苜蓿地下生物量在表层聚集以及土壤表层积累的凋落物使得土壤碳的生物化学循环主要发生在表层。同一年限苜蓿草地在 0—80cm 土层深度内, 土壤固碳量随着土层深度的增加而降低, 且 0—80cm 深度内各土层土壤固碳量均显著高于 80cm 以下土层, 各年限 0—80cm 总固碳量分别占 0—300cm 的 41.02%、39.43%、41.56%、39.59%。80—300cm 土层深度内土壤固碳量基本无显著差异。

不同年限苜蓿草地 0—300cm 土层深度单位面积土壤固碳量以 10 年生显著高于其它年限 ($P<0.05$), 而 1 年生、3 年生、5 年生 3 个年限间无显著差异, 说明苜蓿需要生长到一定年限土壤固碳量才会发生显著变化。各年限平均单位面积土壤固碳量为 12.33、12.77、12.67、14.26 kg/m²。

2.4 黄土高原区域内苜蓿草地固碳总量估算

1 年生、3 年生、5 年生、10 年生各年限苜蓿草地上生物、地下生物及土壤总固碳量合计分别为 12.69、13.49、13.31、14.83 kg/m²。黄土高原苜蓿草地总面积为 105 万 hm²^[35],经实地调查与查阅统计资料表明,其草地面积结构基本为 1 年生苜蓿草地占 10%,3 年生和 5 年生各占 35%,10 年生占 20%。根据不同年限苜蓿草地地上植株部分固碳量、地下生物固碳量(深度为 3 m)和土壤固碳量(深度为 3 m),估算出区域内不同年限苜蓿草地固碳总量,进而对黄土高原苜蓿草地固碳总量进行估算(表 6)。对比地上、地下不同部分以及土壤的固碳量可以看出,苜蓿草地固碳主要集中在土壤固碳,占总固碳量的 95.79%。黄土高原 1 年生、3 年生、5 年生、10 年生各年限苜蓿草地上生物、地下生物及土壤总固碳量分别为 5.434×10⁹、1.150×10⁹及 1.364×10¹¹,苜蓿草地固碳主要集中在 3 年生和 5 年生苜蓿草地,区域苜蓿草地固碳总量为 143.0Tg。

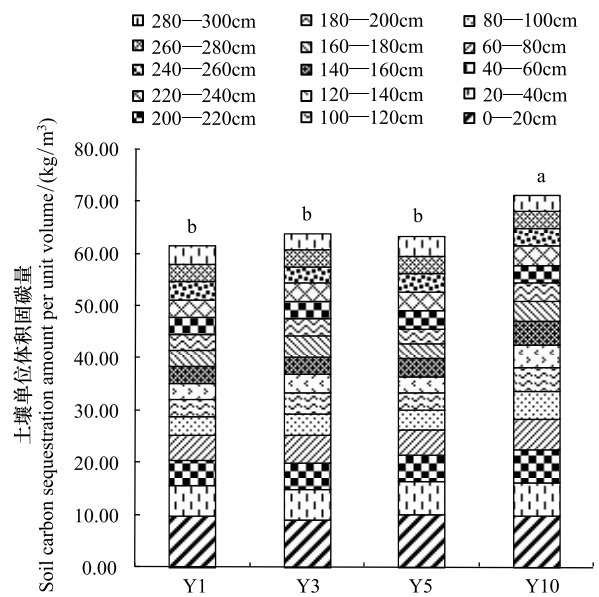


图 2 不同年限苜蓿草地不同土层固碳量
Fig.2 Soil carbon sequestration amount of alfalfa pastures with different planting ages in different soil layers

表 6 区域内苜蓿草地固碳总量

	固碳量 fixed carbon amount				区域内固碳总量 Total fixed carbon amount on Loess Plateau/kg
	地上生物 Above-ground vegetation /(kg/hm ²)	地下生物 Below-ground vegetation /(g/m ²)	土壤 Soil /(kg/m ²)	总量 Total /(kg/m ²)	
Y1	3159.9	39.98	12.33	12.69	1.332×10 ¹⁰
Y3	5877.8	131.66	12.77	13.49	4.958×10 ¹⁰
Y5	5737.5	69.51	12.67	13.31	4.892×10 ¹⁰
Y10	3967.3	175.67	14.26	14.83	3.115×10 ¹⁰
区域内固碳总量 Total fixed carbon amount on Loess Plateau kg	5.434×10 ⁹	1.150×10 ⁹	1.364×10 ¹¹	/	1.430×10 ¹¹ (143.0Tg)

3 结论与讨论

苜蓿草地作为黄土高原草地的重要组成部分,在黄土高原草地生态系统碳循环中占有重要地位。同时由于苜蓿具有固氮和固碳的双重作用,使它在低碳农业的发展中具有重要意义。本文通过对不同年限苜蓿草地上生物、地下生物和土壤固碳量进行测定,对不同年限苜蓿草地的固碳效应作出评价,进而整个黄土高原苜蓿草地的固碳效应进行估算。

3.1 苜蓿草地上生物固碳量

本研究结果表明,不同年限苜蓿草地植株碳含量无明显差异,但是由于不同年限苜蓿草地植株生长能力不同,其生物产量有差异,因而导致其单位面积固碳量也有所差异,1 年生、3 年生、5 年生和 10 年生的单位面积固碳量分别为 315.99、587.78、573.75、396.73 g·m⁻²·a⁻¹。

当前对于中国草地生物量碳库展开了较多研究,针对苜蓿草地生物碳库的研究未见报道。朴世龙等^[25]利用遥感影像得出我国草地植被单位面积地上生物量的平均值约为 44.1g C/m²,Fan 等^[23]通过对我国 17 种草地的生物量进行测量,得出地上生物量密度为 119 g C/m²,Ni^[36]基于牧草产量对我国草地碳储量进行估

算,得出地上生物碳密度为 60 kg C/m^2 。本研究结果各年限苜蓿草地平均单位面积固碳量为 468.6 g C/m^2 ,远高于上述研究中的数据。这主要应是由于苜蓿能够持续高产,具有较强的地上生物固碳能力,因而高于我国草地地上生物固碳的平均水平。当前对于地上生物碳密度研究多按照植物有机干物质中碳占的比重转换为碳量,而本研究对苜蓿的碳含量和生物产量都进行实地测量得出其固碳量,方法更为精准。

草地地上生物固碳主要受生物产量的影响。在黄土高原半干旱环境条件下,紫花苜蓿生长高峰期第 4—5 年,生长到第 6 年,由于土壤水分过耗严重,生物产量逐年下降,草地开始衰败^[37]。本试验在黄土高原半湿润区测定的苜蓿地上生物量结果与半干旱区的结果较为一致,据此对区域苜蓿草地不同年限及总地上生物固碳量的估算结果,对分析我国草地固碳效应具有重要参考价值。

3.2 苜蓿草地地下生物固碳量

当前草地碳库的研究中针对地下生物碳库的研究比较少,主要是由于地下生物量数据难以测量。目前估算草地地下生物量常用的方法有利用根冠比(R:S)和地下和地上部生物量的比例系数估算,但是由于不同类型的草地比例系数不同,这种方法可能会产生较大的误差^[21]。Fan 等^[23]利用地上和地下生物量之间的关系,估算出我国草地地下生物碳密度为 883 g C/m^2 ,朴世龙等^[25]和 Ma 等^[38]也应用同样的方法得出我国草地和北方草地地下生物碳密度分别为 271.14 g C/m^2 和 244.6 g C/m^2 。本试验结果各年限平均地下生物单位面积固碳量为 104.21 g C/m^2 ,低于上述研究。这可能是因为测量方法不同。本试验利用根钻法,取样深度 3m 实地测量,利用地下生物量和地下生物碳含量得出地下生物固碳量更为精确,但是由于抽样取样范围限制,因而使得测量结果偏低。

本研究表明,各年限苜蓿草地地下生物量主要分布在 0—20cm 土层,地下生物固碳也主要集中在该土层深度内,1 年生、3 年生、5 年生、10 年生苜蓿 0—20 cm 土层地下生物固碳量分别占到地下生物 0—300 cm 固碳量的 45.74%、55.68%、53.12% 和 43.28%。不同年限 0—300cm 单位面积固碳量差异显著,10 年生 (175.67 g/m^2) > 3 年生 (131.66 g/m^2) > 5 年生 (69.51 g/m^2) > 1 年生 (39.98 g/m^2)。对于草地地下生物量分布,黄德华等^[46]人对内蒙古多种草原进行研究,表明地下生物量主要分布于土壤表层,土壤 0—30cm 土层地下生物量分别占全部剖面地下生物总量的 74.40%、71.18%、68.68%^[42],这与本试验的结果较为一致。

3.3 苜蓿草地土壤固碳量

当前针对草地土壤碳库开展了许多工作^[20-22,26-27,38-42]。方精云等^[21]综合当前中国草地碳循环研究新进展,认为全国平均水平的土壤碳密度一般不会超过 8.5 kg C/m^2 。本研究结果各年限单位面积土壤固碳量平均值为 13.01 kg/m^2 ,说明苜蓿草地土壤具有较高的固碳能力。经分析应是如下原因:(1)由于苜蓿的优良固氮特性,使得其土壤中的有机碳含量也有所增加。许多研究表明土壤中有有机碳与氮含量呈正相关^[43-45],因此,由于苜蓿较强的固氮能力,使得其能够固定更多的碳。(2)苜蓿的固氮特性使土壤中有较适宜的 C/N 比,能够加速凋落物层的分解,使得土壤中的有机碳含量增加。

目前苜蓿对土壤理化性质影响的研究也进行了许多工作^[47-51],已有研究表明,土壤在 0—20cm 土层有机碳含量最高^[49,51]。本研究结果表明,各年限苜蓿草地土壤固碳量主要集中在 0—80cm 土层深度内,且均在 0—20cm 土层内最高,各年限 0—80cm 固碳量分别占到 0—300cm 的 41.02%、39.43%、41.56%、39.59%。不同年限间以 10 年生土壤固碳量最高,其它年限间无显著差异,各年限 0—300cm 单位体积固碳量分别为 12.33、12.77、12.67、14.26 kg/m^2 。这应是由于苜蓿地下生物量在 0—20cm 表层聚集以及凋落物在土壤表层积累,使得土壤碳的生物化学循环主要发生在土壤表层。同时也有许多研究表明紫花苜蓿对土壤有机质含量的提高只有达到一定的种植年限后才明显^[47-48,51]。本研究结果表明,1 年生、3 年生和 5 年生单位面积土壤固碳量无显著差异,到 10 年的时候才显著提高,与上述结果一致。有关研究分析表明这是由于紫花苜蓿在生长初期需要消耗大量土壤养分,而这段时期其生理机能很弱,基本不能固氮。随着植株生长发育,根部形成大量根瘤菌,具备了固氮能力,此时虽然植株还在继续吸收土壤中的养分,但同时能将空气中的氮素固定,且根部也产生一些有机分泌物,再加上部分地下生物死亡腐烂,可以增加土壤中的有机质^[50]。

邵继承等^[48]研究 1 年生到 6 年生苜蓿取样深度 50cm,表明随着土层的加深,各种年限紫花苜蓿地的有机质含量大致呈先降后升趋势。闻志彬^[49]在种植苜蓿对土壤理化性质影响的研究中取样深度 60cm,得出结果土壤 0—20cm 有机碳含量高于下层,但 20—60cm 土壤有机碳含量差异不大。本研究表明同一年限苜蓿草地在 0—80cm 土层深度内,土壤固碳量随着土层深度的增加而降低,80—300cm 土层深度内土壤固碳量基本无显著差异,与上述结果有所差异,这主要可能是由于取样深度不同所致。

3.3 黄土高原苜蓿草地固碳总量

根据不同年限苜蓿草地地上生物固碳量、地下生物固碳量和土壤固碳量,估算黄土高原苜蓿草地固碳总量为 143.0Tg。程积民等^[33]对黄土高原植被和土壤固碳量的研究表明黄土高原草地总固碳量为 573.10 Tg,可见苜蓿草地在黄土高原草地固碳中发挥着重要作用。

根据本研究结果,10a 固碳能力最强,但 10 年生苜蓿草地的植株已处于衰败期,且植株的固碳能力已经下降,而 5 年生苜蓿地上生物产量高,且固碳能力强,因此实行草田轮作的耕作制度,建议种植苜蓿 5a 后开始轮作换茬。

References:

- [1] The Team of Sustainable Development Strategy Study of Chinese Academy of Sciences. 2009 China sustainable development strategic report-explore the way of the low carbon with Chinese characteristics. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] Wu Q B, Wang X K, Duan X N, Deng L B, Lu F, Ouyang Z Y, Feng Z W. Carbon sequestration and its potential by forest ecosystems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008,28(2):517-524.
- [3] Wang X K, Feng Z W, Ouyang Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001,12(1):13-16.
- [4] Xu X L, Cao M K, Li K R. Temporal-spatial dynamics of carbon storage of forest vegetation in China. *Progress in Geography*, 2007,26(6):1-10.
- [5] Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2000,20(5):733-740.
- [6] Ma Q Y, Chen X L, Wang J, Lin C, Kang F F, Cao W Q, Ma Z B, Li W Y. Carbon content rate in constructive species of main forest types in northern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002,24(5/6):96-100.
- [7] Xie L H, Zhang R T. Forest carbon sequestration assessment and potential analysis in Heilongjiang Province. *Territory & Natural Resources Study*, 2011,04:88-89.
- [8] Yan D R, Le L. Forest carbon storage and its regional change feature in Inner Mongolia. *Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, 2010,36(3):19-22.
- [9] Jiao X M, Xiang W H, Tian D L. Carbon storage of forest vegetation and its geographical distribution in Hunan Province. *Journal of Central South Forestry University*, 2005,25(1):4-8.
- [10] Cao J, Zhang Y L, Liu Y H. Changes in forest biomass carbon storage in Hainan Island over the last 20 years. *Geographical Research*, 2002,21(5):551-560.
- [11] Zhao T, Wang Y X, Xu G Z, Weng B Q. Changes of organic carbon content in cropland topsoil. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2011,26(3):498-503.
- [12] Huang Y, Sun W J. Changes of organic carbon content in cropland topsoil in recent 20 years in China. *Chinese Science Bulletin*, 2006,51(7):750-763.
- [13] Xu X W. Distribution and changes of organic carbon content in cropland soil at different regional scale [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008.
- [14] Cheng K, Pan G X, Tian Y G, Li L Q. Changes in topsoil organic carbon of China's cropland evidenced from the national soil monitoring network. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009,28(12):2476-2481.
- [15] Wang C J, Pan G X, Tian Y G, Li L Q, Zhang X H, Han X J. Changes in cropland topsoil organic carbon with different fertilizations under long-term agro-ecosystem experiments across mainland China. *Sci China Life Sci*, 2010,53(7):858-867.
- [16] Shen X R, Lu J L, Zhang W J, Xin J S, Ren Y, Xu M G. Changes in soil organic carbon and total nitrogen and its relationship under three typical cropping systems in China. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011,29(4):121-126.
- [17] Zhang J H, Li G D, Nan Z R, Xiao H L, Zhao L P. Effects of cultivation history and cropping system on soil organic carbon and its components in oasis soils. *Journal of Natural Resources*, 2012,27(2):196-203.
- [18] Zhang W J, Wang X J, Xu M G, Huang S M, Liu H, and Peng C. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China. *Biogeosciences*, 2010,07:409-425.
- [19] Hou Ruixing, Ouyang Zhu, Li Yunsheng, Donald D. Tyler, Li Fadong, Glenn V. Wilson. Effects of tillage and residue management on soil organic carbon and total nitrogen in the north China plain. *Soil Science Society of America Journal*, 2012,76(1):230-240.

- [20] Qi Y C, Dong Y S, Geng Y B, Yang X H, Geng H L. The progress in the carbon cycle researches in grassland ecosystem in China. *Progress In Geography*, 2003,22(4):342-352.
- [21] Fang J Y, Yang Y H, Ma W H, Mohammad A, Shen H H. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands. *Sci China Life Sci*, 2010, 53: 757-765.
- [22] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. *Journal of Arid Environment*, 2002, 50(2): 205-218.
- [23] Fan J W, Zhong H P, Harris W, Wang S Q, Hu Z M, Yue Y Z. Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above- and below-ground biomass. *Climatic Change*, 2008, 86(3/4): 375-396.
- [24] Zhong H P, Fan J W, Yu G R, Han B. The research progress of carbon storage in grassland ecosystem. *Pratacultural Science*, 2005,22(1):4-11.
- [25] Piao S L, Fang J Y, He J S, Xiao Y. Spatial distribution of grassland biomass in China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004,28(4)491-498.
- [26] Liu W, Cheng J M, Gao Y, Cheng J, Liang W P. Distribution of soil organic carbon in grassland on Loss Plateau and its influence factors. *Acta Pedologica Sinica*, 2012,49(1):68-76.
- [27] Cheng J M, Cheng J, Yang X M. Grassland vegetation and soil carbon sequestration in the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2011,26(3):401-409.
- [28] Cheng J M, Cheng J, Yang X M, Liu W, Cheng F R. Spatial distribution of carbon density in grassland vegetation of the Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012,32(1):226-237.
- [29] Ma W H, Han M, Lin X, Ren Y L, Wang Z H, Fang J Y. Carbon storage in vegetation of grasslands in Inner Mongolia. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006,20(3):192-195.
- [30] Wang G X, Cheng G D, Shen Y P. Soil Organic Carbon pool of grasslands on the Tibetan Plateau and its global implication. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002,24(6):693-700.
- [31] Wang J L, Chang T J, Li P, Cheng H H, Fang H L. Vegetation carbon reserve and its relationship with climatic factors of grassland system in Tibet. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008,22(3):120-125.
- [32] Wang C J, Wang Y X, Hu Y B, Weng B Q. Issues on low-carbon agriculture: from theory to practices. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 26(3): 470-474.
- [33] Su Y Z, Liu W J, Yang R, Fan G P. Carbon sequestration effect following retirement of degraded croplands into alfalfa forage land in the middle of Hexi Corridor region, northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009,29(12):6385-6391.
- [34] Liu Y H, Shi J A, Han Q F, Jia Z K, Ren H Y, Wu X W. Calibration study of the determination of alfalfa soil moisture with neutron probe. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007,25(2):115-119.
- [35] Geng H Z, Chinese Alfalfa. Beijing: China Agricultural Press, 1995:1-8.
- [36] Ni J. Forage yield-based carbon storage in grassland of China. *Climate Change*, 2004, 67:234-246.
- [37] Cheng J M, Wan H E, Wang J. Alfalfa growth and its relation with soil water status in loess hilly and gully region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005,16(3):435-438.
- [38] Ma W H, Fang J Y, Yang Y H, et al. Biomass carbon stocks and their changes in northern China's grasslands during 1982 - 2006. *Sci China Life Sci*, 2010, 53(7): 841-850.
- [39] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, Smith P, Mohammad A, Wang S P, Wang W. Soil carbon stock and its changes in northern China's grasslands from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, 2010,16(11):3036-3047.
- [40] Li K R, Wang S Q, Cao M K. Vegetation and soil carbon storage in China. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 2004, 47(1): 49-57.
- [41] Yang T T, Wu X H, Wang J T, Li P, Shi H X. Estimation of carbon storage in grassland ecosystem in China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012,26(3):127-130.
- [42] Guo R, Wang X K, Lu F, Duan X N, Ouyang Z Y. Soil carbon sequestration and its potential by grassland ecosystems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008,28(2):862-867.
- [43] Liu S Q, Gao L L, Pu Y L, Deng L J, Zhang S R. Analysis on status of soil organic matter and N nutrient and their influencing factors in Tibet. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004,18(6):54-57+67.
- [44] Sun D M, Chen X C. Correlation analysis of soil organic matter, total nitrogen and available nitrogen in Heilongjiang Province. *Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University*, 1995,8(2):57-60.
- [45] Zu Y G, Li R, Wang W J, Su D X, Wang Y, Qiu L. Soil organic and inorganic carbon contents in relation to soil physicochemical properties in northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011,31(18):5207-5216.
- [46] Huang D H, Chen Z Z, Zhang H F. Comparison of Below-ground biomass between *Stipa baicalensis*, *Stipa krylovii* and *Filifolium sibiricum* grassland in Inner Mongolia//Grassland Ecosystem Orientation Station in Inner Mongolia. *Grassland Ecosystem Research 2*. Beijing: Science Press, 1988:122-131.
- [47] Yang Y H, Jiang P A. Studies on soil properties of lucerne with different cultivating ages. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005,19(2): 110-113.
- [48] Tai J C, Yang H S, Zhang Q G, Song C L. Influence of planting years on nitrogen-fixing capacity of rhizosphere and contents of carbon and nitrogen in artificial pastures of alfalfa. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010,41(3):603-607.
- [49] Wen Z B. The Influence of planting alfalfa on the physico-chemical characteristics of Soil [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008.
- [50] Guo Y Q, Wang J F, Gao X. The influence of planting the purple flower alfalfa on the nutrition content of the soil. *Journal of Sichuan Grassland*, 2000,(4):20-24.

- [51] Cao Y H, Jia Z K, Han Q F. Effect of alfalfa growth years on its yield and soil characteristics. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26 (3): 104-108.

参考文献:

- [2] 吴庆标,王效科,段晓男,邓立斌,逯非,欧阳志云,冯宗炜. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力. *生态学报*, 2008, 28(2): 517-524.
- [3] 王效科,冯宗炜,欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 13-16.
- [4] 徐新良,曹明奎,李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究. *地理科学进展*, 2007, 26(6): 1-10.
- [5] 刘国华,傅伯杰,方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.
- [6] 马钦彦,陈遐林,王娟,蔺琛,康峰峰,曹文强,马志波,李文宇. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5/6): 96-100.
- [7] 谢立红,张荣涛. 黑龙江省森林碳汇估算及潜力分析. *国土与自然资源研究*, 2011, 04: 88-89.
- [8] 闫德仁,乐林. 内蒙古森林碳储量及其区域变化特征. *内蒙古林业科技*, 2010, 36(3): 19-22.
- [9] 焦秀梅,项文化,田大伦. 湖南省森林植被的碳贮量及其地理分布规律. *中南林学院学报*, 2005, 25(1): 4-8.
- [10] 曹军,张德铨,刘燕华. 近 20 年海南岛森林生态系统碳储量变化. *地理研究*, 2002, 21(5): 551-560.
- [11] 赵婷,王义祥,徐国忠,翁伯琦. 农田表土有机碳含量变化特征及其研究进展. *福建农业学报*, 2011, 26(3): 498-503.
- [12] 黄耀,孙文娟. 近 20 年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势. *科学通报*, 2006, 51(7): 750-763.
- [13] 许信旺. 不同尺度区域农田土壤有机碳分布与变化[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [14] 程琨,潘根兴,田有国,李恋卿. 中国农田表土有机碳含量变化特征——基于国家耕地土壤监测数据. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2476-2481.
- [16] 申小冉,吕家珑,张文菊,辛景树,任意,徐明岗. 我国三种种植制度下农田土壤有机碳、氮关系的演变特征. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(4): 121-126.
- [17] 张俊华,李国栋,南忠仁,肖洪浪,赵丽萍. 耕作历史和种植制度对绿洲农田土壤有机碳及其组分的影响. *自然资源学报*, 2012, 27(2): 196-203.
- [20] 齐玉春,董云社,耿元波,杨小红,耿会立. 我国草地生态系统碳循环研究进展. *地理科学进展*, 2003, 22(4): 342-352.
- [24] 钟华平,樊江文,于贵瑞,韩彬. 草地生态系统碳蓄积的研究进展. *草业科学*, 2005, 22(1): 4-11.
- [25] 朴世龙,方精云,贺金生,等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 491-498.
- [26] 刘伟,程积民,高阳,程杰,梁万鹏. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素. *土壤学报*, 2012, 49(1): 68-76.
- [27] 程积民,程杰,杨晓梅. 黄土高原草地植被与土壤固碳量研究. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 401-409.
- [28] 程积民,程杰,杨晓梅,刘伟,陈芙蓉. 黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征. *生态学报*, 2012, 32(1): 226-237.
- [29] 马文红,韩梅,林鑫,任艳林,王志恒,方精云. 内蒙古温带草地植被的碳储量. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(3): 192-195.
- [30] 王根绪,程国栋,沈水平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义. *冰川冻土*, 2002, 24(6): 693-700.
- [31] 王建林,常天军,李鹏,成海宏,方华丽. 西藏草地生态系统植被碳贮量及其影响因子分析. *水土保持学报*, 2008, 22(3): 120-125.
- [32] 王成己,王义祥,黄毅斌,翁伯琦. 低碳农业: 从理论构想到科学实践的若干问题. *福建农业学报*, 2011, 26(3): 470-474.
- [33] 苏永中,刘文杰,杨荣,范桂萍. 河西走廊中段绿洲退化土地退耕种植苜蓿的固碳效应. *生态学报*, 2009, 29(12): 6385-6391.
- [34] 刘玉华,史纪安,韩清芳,贾志宽,任鸿远,吴新卫. 中子仪测定苜蓿田土壤含水量的标定研究. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(2): 115-119.
- [35] 耿华珠. 中国苜蓿. 北京: 中国农业出版社, 1995: 1-8.
- [37] 程积民,万惠娥,王静. 黄土丘陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化. *应用生态学报*, 2005, 16(3): 435-438.
- [41] 杨婷婷,吴新宏,王加亭,李鹏,石红霄. 中国草地生态系统碳储量估算. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(3): 127-130.
- [42] 郭然,王效科,逯非,段晓男,欧阳志云. 中国草地土壤生态系统固碳现状和潜力. *生态学报*, 2008, 28(2): 862-867.
- [43] 刘世全,高丽丽,蒲玉琳,邓良基,张世熔. 西藏土壤有机质和氮素状况及其影响因素分析. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 54-57+67.
- [44] 孙冬梅,陈学昌. 黑龙江省土壤有机质与全氮和碱解氮的相关分析. *黑龙江八一农垦大学学报*, 1995, 8(2): 57-60.
- [45] 祖元刚,李冉,王文杰,苏冬雪,王莹,邱岭. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性. *生态学报*, 2011, 31(18): 5207-5216.
- [46] 黄德华,陈佐忠,张鸿芳. 贝加尔针茅、克氏针茅、线叶菊草原地下生物量的比较研究//内蒙古草原生态系统定位站. 草地生态系统研究第 2 集. 北京: 科学出版社, 1988: 122-131.
- [47] 杨玉海,蒋平安. 不同种植年限苜蓿地土壤理化特性研究. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 110-113.
- [48] 邵继承,杨恒山,张庆国,宋春丽. 种植年限对紫花苜蓿人工草地土壤碳、氮含量及根际土壤固氮力的影响. *土壤通报*, 2010, 41(3): 603-607.
- [49] 闻志彬. 种植紫花苜蓿对土壤理化性状的影响[D]. 西北农林科技大学, 2008.
- [50] 郭玉泉,王金芬,高翔. 种植紫花苜蓿对土壤养份的影响. *四川草原*, 2000, (4): 20-24.
- [51] 曹永红,贾志宽,韩清芳. 苜蓿生长年限对其产量及土壤性状的影响. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(3): 104-108.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.23 Dec., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Ozone uptake at the canopy level in *Robinia pseudoacacia* in Beijing based on sap flow measurements WANG Hua, OUYANG Zhiyun, REN Yufen, et al (7323)
- Genetic impact of swimming crab *Portunus trituberculatus* farming on wild genetic resources in Haizhou Bay DONG Zhiguo, LI Xiaoying, ZHANG Qingqi, et al (7332)
- The effect of soil salinity to improve the drought tolerance of arrowleaf saltbush TAN Yongqin, BAI Xinfu, HOU Yuping, et al (7340)
- Effects of *Liriomyza huidobrensis* infestation on the activities of four defensive enzymes in the leaves of cucumber plants SUN Xinghua, ZHOU Xiaorong, PANG Baoping, et al (7348)

Autecology & Fundamentals

- Early effects of simulated nitrogen deposition on annual nutrient input from litterfall in a *Pleioblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China XIAO Yinlong, TU Lihua, HU Tingxing, et al (7355)
- Relationship between nutrient characteristics and yields of tumorous stem mustard at different growth stage ZHAO Huan, LI Huihe, LÜ Huifeng, et al (7364)
- Decomposition rate and silicon dynamic of mulching residue under *Phyllostachys praecox* stands HUANG Zhangting, ZHANG Yan, SONG Zhaoliang, et al (7373)
- Effects of waterlogging on the growth and physiological properties of juvenile oilseed rape ZHANG Shujie, LIAO Xing, HU Xiaojia, et al (7382)
- The crude protein content of main food plants of François' langur (*Trachypithecus francoisi*) in Fusui, Guangxi, China LI Youbang, DING Ping, HUANG Chengming, et al (7390)
- Effects of nitrogen on photosynthetic characteristics and enzyme activity of nitrogen metabolism in maize under-mulch-drip irrigation GU Yan, HU Wenhe, XU Baijun, et al (7399)
- Ecotoxicological effects of exposure to PFOS on embryo and larva of zabrafish *Danio rerio* XIA Jigang, NIU Cuijuan, SUN Luyin (7408)
- Allelopathic effects of extracts from *Ulva prolifera* powders on the growth of *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* HAN Xiurong, GAO Song, HOU Junni, et al (7417)
- Predation evaluation of *Diaphorina citri*'s (Homoptera: Chermidae) natural enemies using the CO I marker gene MENG Xiang, OUYANG Gecheng, XIA Yulu, et al (7430)
- Effect of volatiles from healthy or worm bored Korean pine on host selective behavior of *Dioryctria sylvestrella* and its parasitoid *Macrocentrus* sp. WANG Qi, YAN Shanchun, YAN Junxin, et al (7437)

Population, Community and Ecosystem

- Relationship between rhizosphere microbial community functional diversity and faba bean fusarium wilt occurrence in wheat and faba bean intercropping system DONG Yan, DONG Kun, TANG Li, et al (7445)
- Characteristics of soil fertility in different ecosystems in depressions between karst hills YU Yang, DU Hu, SONG Tongqing, et al (7455)
- Evaluation on carbon sequestration effects of artificial alfalfa pastures in the Loess Plateau area LI Wenjing, WANG Zhen, HAN Qingfang, et al (7467)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Effects of deep vertically rotary tillage on soil water and water use efficiency in northern China's Huang-huai-hai Region LI Yibing, PANG Huancheng, YANG Xue, et al (7478)

- Effects of landscape patterns on runoff and sediment export from typical agroforestry watersheds in the Three Gorges Reservoir area, China HUANG Zhilin, TIAN Yaowu, XIAO Wenfa, et al (7487)
- Land cover classification of Yancheng Coastal Natural Wetlands based on BP neural network and ETM+ remote sensing data XIAO Jincheng, OU Weixin, FU Haiyue (7496)
- Early responses of soil CH₄ uptake to increased atmospheric nitrogen deposition in a cold-temperate coniferous forest GAO Wenlong, CHENG Shulan, FANG Huajun, et al (7505)
- Temporal-spatial characteristics of soil respiration in Chinese boreal forest ecosystem JIA Bingrui, ZHOU Guangsheng, JIANG Yanling, et al (7516)
- Seasonal and interannual variability in soil respiration in wheat field of the Loess Plateau, China ZHOU Xiaoping, WANG Xiaoke, ZHANG Hongxing, et al (7525)
- Dynamics of atmospheric ammonia concentrations near different emission sources LIU Jieyun, KUANG Fuhong, TANG Aohan, et al (7537)
- Influence of residues and earthworms application on N₂O emissions of winter wheat ... LUO Tianxiang, HU Feng, LI Huixin (7545)
- Resource and Industrial Ecology**
- Ecological monitoring of the fish resources catching and stocking in Lake Tianmu basing on the hydroacoustic method SUN Mingbo, GU Xiaohong, ZENG Qingfei, et al (7553)
- Application of support vector machine to evaluate the eutrophication status of Taihu Lake ZHANG Chengcheng, SHEN Aichun, ZHANG Xiaoqing, et al (7563)
- Research Notes**
- Amount and dynamic characteristics of litterfall in four forest types in subtropical China XU Wangming, YAN Wende, LI Jiebing, et al (7570)
- Allelopathic effects of artemisinin on seed germination and seedling growth of vegetables BAI Zhen, HUANG Yue, HUANG Jianguo (7576)
- Nitric oxide participates symbiosis between am fungi and tobacco plants WANG Wei, ZHAO Fanggui, HOU Lixia, et al (7583)
- Mapping wildlife habitat suitability using kernel density estimation ZHANG Guiming, ZHU A'xing, YANG Shengtian, et al (7590)
- Effects of nitrogen fertilizer methods on the content of *Bacillus thuringiensis* insecticidal protein and yield of transgenic cotton MA Zongbin, LIU Guizhen, YAN Gentu, et al (7601)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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,280 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

本期责任副主编 王德利

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 33 卷 第 23 期 (2013 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 23 (December, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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:100717	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 90.00 元