

DOI: 10.5846/stxb201310212541

戴尔阜, 黄宇, 赵东升. 草地土壤固碳潜力研究进展. 生态学报, 2015, 35(12): 3908-3918.

Dai E F, Huang Y, Zhao D S. Review on soil carbon sequestration potential in grassland ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 3908-3918.

草地土壤固碳潜力研究进展

戴尔阜^{1,*}, 黄宇^{1,2}, 赵东升¹

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 土壤固碳功能和固碳潜力已成为全球气候变化和陆地生态系统研究的重点。草地土壤有机碳库, 作为陆地土壤有机碳库的重要组成部分, 其较小幅度的波动, 将会影响整个陆地生态系统碳循环, 进而影响全球气候变化。因此, 深入研究草地土壤固碳功能和固碳潜力对于适应和减缓气候变化具有重要意义。在土壤固碳潜力相关概念界定基础上, 结合《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》, 从样点及区域尺度上综述了目前关于草地土壤固碳潜力的一般估算方法, 同时对各类方法的特点及适用性进行了评述, 提出了草地生态系统固碳潜力研究概念模型。最后在对草地土壤固碳的影响因素及固碳措施总结的基础上, 阐明了草地土壤有机碳固定研究中存在的问题和发展前景。

关键词: 草地生态系统; 土壤有机碳; 固碳潜力

Review on soil carbon sequestration potential in grassland ecosystems

DAI Erfu^{1,*}, HUANG Yu^{1,2}, ZHAO Dongsheng¹

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Global climate change has aroused wide concern from the international community, and national or regional GHG (greenhouse gas) emission has become a focus of the intergovernmental diplomatic dispute and mediation. The stability, release or increment of the soil carbon stock is closely related to the change of the atmospheric carbon stock. Even a minor change in soil organic carbon (SOC) storage may result in a significant change in atmospheric CO₂ concentration. Whether the soil carbon stock can increase becomes an essential theoretical basis for terrestrial ecosystems to absorb atmospheric CO₂, and serve as carbon sink. Therefore, increasing soil carbon sink in terrestrial ecosystems has become an important strategy for controlling the rise in atmospheric CO₂ concentration. As one of the world's most widespread terrestrial ecosystems, covering over 15% of the world's land surface, grassland ecosystems account for over 10% of the total carbon storage in terrestrial ecosystems, with nearly 90% of the carbon storing in top soil. Besides, grassland soil organic carbon could be strongly influenced by management practices. During the past decades, owing to the climate change, overgrazing and other unreasonable management practices, the grasslands in the world had been seriously degraded and the soil organic carbon had significantly decreased. However, improved management practices such as enclosure and recovery of degraded grassland and conversion of cropland to abandoned fields, may reverse the loss of soil organic carbon, and even help to sequester carbon in the atmosphere. Therefore, under the background of climate change, the function and potential of soil organic carbon sequestration in grassland ecosystems has become a key issue. In this essay, the recent research on soil

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB403206, 2012CB416906); 国家科技支撑计划(2013BAC03B04); 国家自然科学基金项目(41371196)

收稿日期: 2013-10-21; **网络出版日期:** 2014-08-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: daief@igsrr.ac.cn

carbon sequestration potential was reviewed, including quantitative methods for estimating soil carbon sequestration potential on both regional and sample scales, dominant affecting factors and management practices of carbon sequestration, and future research direction was also proposed lastly. Research on quantitative estimation of soil carbon sequestration in grassland ecosystems had been well developed in recent years, from simple statistics on sample scale to mechanism modeling coupled with GIS and RS on regional scale. IPCC also issued guidelines for national greenhouse gas inventories so as to provide a relatively uniform method for national carbon sequestration estimation, which contained three tiers on estimation of soil organic carbon storage in grassland: Tier1, Tier2, and Tier3. Among all the quantitative methods, mechanism modeling of soil carbon cycle became a major method to assess the carbon sequestration of terrestrial ecosystems and the reduction of greenhouse gas emission in the world. The dominant factors affecting soil organic carbon sequestration included natural factors (temperature, precipitation and CO₂ concentration etc.) and human factors (reclamation, grazing, fire, enclosure, fertilization, irrigation and reseeding etc.), which held complicated influences on carbon sequestration with various time and intensity of management practices. There also existed many problems needed to be solved in the future, such as the methodology and adaptability of models and the uncertainty of estimation on regional scale. The potential and mechanism of carbon sequestration, and the relationship between carbon sequestration and environmental effects would be the key scientific problems.

Key Words: grassland ecosystem; soil organic carbon; carbon sequestration potential

随着全球工业的飞速发展和人为活动的不断深化,生物圈和土壤圈有机碳大量释放,大气中 CO₂ 等气体浓度逐年增加,对地球系统的影响日益加剧。地球陆地生态系统碳循环与温室效应问题,一直是全球碳计划 (Global Carbon Project, GCP)、过去全球变化 (Past Global Changes, PAGES)、国际全球环境变化人文因素计划 (International Human Dimensions Program on Global Environmental Change, IHDP) 以及全球变化与陆地生态系统计划 (Global Change And Terrestrial Ecosystems, GCTE) 等一系列国际全球变化研究核心计划的焦点科学内容^[1]。自 1988 年政府间气候变化专业委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 成立以来,世界各国开展了多次气候变化国际谈判。各国携手应对气候变化,共同推进绿色、低碳发展已成为当今世界的普遍认识。

全球陆地生态系统存在着巨大的碳汇潜力^[2]。土壤碳库大约有 1550 Pg 有机碳和 750 Pg 无机碳 (0—1 m 土层),是大气碳库 (760 Pg) 的 3 倍,生物碳库 (560 Pg) 的 3.8 倍,成为陆地生态系统中最大的有机碳库,在全球碳循环中起着关键作用^[3]。草地生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分 (图 1)^[4],其碳储量约占陆地生态系统总碳储量的 12.7%,其中草地土壤的碳储量约占草地总碳储量的 90%^[5]。因此,草地生态系统土壤有机碳 (SOC) 库的微小变化都将引起大气中 CO₂ 含量的显著变化,在全球气候变化中扮演着重要角色。近年来,由于过度放牧、开垦等人类活动的干扰及气候变化等自然因素的影响,草地生态系统正面临严重的退化问题,造成了土壤有机碳的损失。人工种草、围封草场等固碳措施可以促进草地土壤有机碳的恢复和积累,具有固定大气 CO₂ 能力,是一种低成本的固碳减排措施。因此,世界各国积极开展草地生态系统土壤固碳潜力 (CSP) 的研究,以期增加草地土壤碳截存、减缓草地土壤中温室气体排放,为气候谈判争取主动权提供科学依据。本文在界定草地土壤固碳潜力概念基础上,重点对其估算方法和影响固碳能力因素进行分析,进而指出

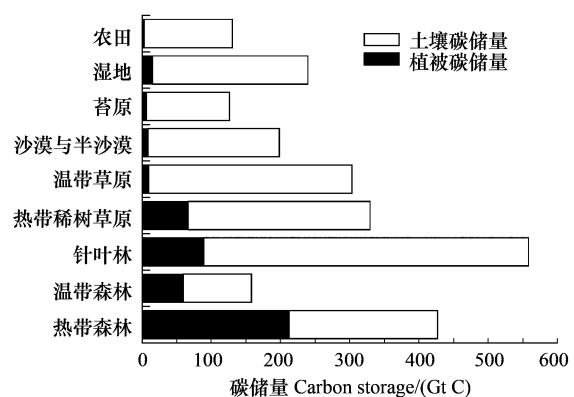


图 1 陆地生态系统主要碳库

Fig.1 Major Carbon Stocks in Terrestrial Ecosystem

具有固定大气 CO₂ 能力,是一种低成本的固碳减排措施。因此,世界各国积极开展草地生态系统土壤固碳潜力 (CSP) 的研究,以期增加草地土壤碳截存、减缓草地土壤中温室气体排放,为气候谈判争取主动权提供科学依据。本文在界定草地土壤固碳潜力概念基础上,重点对其估算方法和影响固碳能力因素进行分析,进而指出

了目前该研究存在的问题及其未来发展方向。

1 土壤固碳潜力相关概念界定

土壤有机质(SOM)概念是指通过微生物作用所形成的腐殖质、动植物残体和微生物体的合称,其中的碳即为土壤有机碳(SOC)。土壤有机碳的含量是进入土壤的生物残体等有机物质的输入与以土壤微生物分解作用为主的有机物质的损失之间的平衡。对于土壤有机碳的研究,多数学者集中于碳储量定量估算及影响因素分析上。自上世纪 60 年代以来,就有国外学者开始对土壤有机碳库的估算进行研究,至今大致经历了 3 个阶段:早期对 SOC 库的估计是根据少数剖面资料进行推算的^[6-7];从 20 世纪 80 年代开始,世界各国的 SOC 库研究一般按植被类型、土壤类型、生命带或模型法来作统计^[8-9];近些年,SOC 库研究的新进展,是利用 GIS 技术从区域尺度上描述土壤碳库不同层次的属性特征及其空间分布^[10-12],实现了土壤有机碳估算从少数剖面点到区域模型模拟的飞速发展。关于土壤有机碳主导影响因子的研究,主要集中于气候因子、大气成分、植被、土壤理化特性等自然因素及土地利用方式改变、耕作方式与管理等人为因素对土壤有机碳的影响上。近年来,随着全球温室效应的加剧,土壤有机碳固定的研究越来越引起专家学者的关注,气候变化下土壤有机碳动态、固碳措施及固碳潜力研究日益成为全球陆地碳循环研究的热点。

1.1 土壤固碳潜力

土壤有机碳固定的研究最早起源于美国,早在 20 世纪 90 年代美国能源部就开始研究如何将大气中的 CO₂封存在土壤中,从而降低温室效应的负面影响。在美国,于 2001 年提出了固碳科学(Carbon Sequestration Science)和固碳科学技术(Science and Technology of Carbon Sequestration)的概念^[13]。美国土壤学会将土壤固碳定义为:碳固定是碳以稳定固体的形式被储存,是通过大气 CO₂被直接或间接固定而实现的。直接的土壤固碳是无机化学反应,将 CO₂转化为诸如钙或碳酸镁之类的土壤无机物的过程;间接的植物固碳是植物通过光合作用将大气中的 CO₂转化为植物能量,此后一部分植物能量在分解过程中被间接固定为 SOC^[14]。

不同学者对土壤固碳潜力(CSP)的定义不同,Post 等人最早将自然植被下的土壤有机碳含量作为农业土壤固碳潜力^[15];Six 等人从土壤属性本身的保护机制出发,把土壤固持碳的理论最大量称为固碳潜力^[16];Sperow 等人综合考虑气候和农业管理的交互作用,将未来气候变化条件下土壤的固碳空间视为固碳潜力^[17];郭然等人^[18]认为,退化草地恢复的固碳潜力就是退化草地恢复到退化前草地的土壤有机碳水平时所能够固定的土壤有机碳总量,可通过草地退化面积和过牧造成的土壤有机碳损失量来估算,他们还认为草地管理措施的固碳潜力则可以根据草地管理措施的实施面积和单位面积的固碳速率来估算,固碳速率指采取措施和不采取措施两种情景导致的土壤有机碳的年增量。目前,国际上对于土壤固碳潜力并没有标准化的定义,但当前研究中的土壤固碳潜力,多指在未来气候变化背景和推荐的管理措施(Recommended Management Practices, RMPs)下,使大气中 CO₂封存在土壤中的最大量。所以,关于土壤固碳潜力的估算便转为估算不同固碳情景下的土壤有机碳储量的增加量,与之相关的概念包括土壤有机碳密度及土壤有机碳储量。

1.2 土壤有机碳密度

土壤有机碳密度(SOCD),是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳的质量,单位为 Kg C/m²、Pg C/m²或 T C/hm²等。一般某一土层 i 的有机碳密度 SOCD _{i} ,计算公式如下^[19]:

$$\text{SOCD}_i = C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 10 \quad (1)$$

式中, C_i 为土壤有机碳含量(%); D_i 为土壤容重(g/cm³); E_i 为土层厚度(cm); G_i 为大于 2mm 的砾石所占的体积百分比(%)。

1.3 土壤有机碳储量

土壤有机碳储量,是进入土壤的植物残体量及其在土壤微生物作用下分解损失量二者之间平衡的结果,一般指区域范围内一定深度的土层中土壤有机碳总质量,单位为 Kg C 或 Pg C 或 T C 等。一般由土壤有机碳密度(SOCD _{j})与对应面积(S_j)相乘所得。

$$\text{SOC} = \text{SOCD}_j \times S_j$$

(2)

2 草地土壤固碳潜力估算方法

草地生态系统固碳主要包括植被光合作用的固碳和通过一定的措施稳定土壤结构,改善土壤性质,促进土壤固碳两方面。草地生态系统土壤固碳潜力通常指不同固碳管理措施下,草地土壤有机碳库的增加量。因此,关于草地土壤固碳潜力估算方法,主要从 IPCC 制定的草地土壤有机碳库变化的特定估算方法,及样点、区域尺度上草地土壤固碳量的一般估算方法上进行总结与归纳。

2.1 IPCC 关于草地土壤有机碳库变化的估算方法

大量证据表明,由于大气中 CO₂等温室气体的增加,全球气候正在发生史无前例的急剧变化。如何较为准确的估算全球碳储量及其变化,量化全球碳循环过程,成为全球气候变化的研究重点。此前国际上并未有较为统一的土壤有机碳储量变化的估算方法,因此,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》(简称《清单指南》)^[20],给出了 3 个层次的土壤有机碳变化估计方法(Tier 1、Tier 2 和 Tier 3)。这为各个国家相对准确估算的土壤有机碳储量及碳潜力、缩小估算偏差,提供了统一的方法和规范。因此,采用 IPCC 提供的方法估算土壤有机碳库及其变化,对于国家或全球层面上的碳估算及碳循环研究都有一定的意义。

《清单指南》中明确介绍了草地土壤有机碳库变化的估算方法,包括通用方法和专门适用于草地的估算方法。卷 4 第二章《适用于多个土地利用类别的通用方法》中指出,对于土壤中的碳库变化估算方法包括 3 种,即缺省值的方法、纳入国家特定数据的方法和高级估算方法(表 1)。卷 4 第六章《草地》中指出,草地土壤碳估算方法仍然采用通用公式,只是需要结合草地管理的特定库变化因子,根据获取的数据合理选用 3 种方法。

表 1 IPCC 制定的草地土壤有机碳库变化估算的三个层次

Table 1 Three tiers of estimation on change of soil organic carbon storage in grassland established by IPCC				
层次 Tiers	方法 Methods	特征 Characteristics	研究尺度 Scales	适用性 Applicability
层次 1 Tier 1	缺省值的方法	基于 30cm 深度;考虑气候、土壤及区域特征,结合土地利用、管理措施及有机质投入的库变化因子,并按各自缺省值进行估算	区域或国家等较大尺度	基于 IPCC 排放因子数据库,易于实现;估算结果较为粗略,仅提供参考
层次 2 Tier 2	纳入国家特定数据的方法	基于 30cm 深度;纳入国家特定数据,对各缺省值进行修订;可结合土地利用转移矩阵精确到地块估算碳库变化	区域或样点尺度	需要大量数据修订;较易实现;估算结果更为准确
层次 3 Tier 3	高级估算方法	基于不同深度层;结合更为精确的网络观测数据,包括水文状况、植被组分等,利用过程模型进行准确模拟和估算	区域或样点尺度	需要大量长期定位观测实验;不易实现;估算结果最为精确

2.1.1 缺省值的方法

Tier 1 是根据《清单指南》提供的土壤有机碳初始密度缺省值和排放因子缺省值进行估计,是基于一个确定时期内土壤的碳库变化估算,变化的计算基于管理实施后的碳库相对于参照条件(即没有退化或改良的自然植被)的碳库变化。缺省值即默认的世界平均值,管理措施可采用统计结果。

土壤有机碳储量 SOC 计算公式:

$$\text{SOC} = \sum (\text{SOC}_{\text{参考c.s.i}} \times F_{\text{LUc.s.i}} \times F_{\text{MGc.s.i}} \times F_{\text{Ic.s.i}} \times A_{\text{c.s.i}})$$

(3)

土壤有机碳储量变化估算公式:

$$\Delta C = (\text{SOC}_0 - \text{SOC}_{0-T})/D$$

(4)

式中,SOC₀ 为清查时期末年的土壤有机碳库储量,SOC_{0-T}清查时期初期的土壤有机碳储量,T 为一个单独清查

时期的年数, D 为库变化系数的时间依赖(通常是 20a), c 表示气候带, s 表示土壤类型, i 表示一国的管理体系, $\text{SOC}_{\text{参考}}$ 为参考碳库的缺省值(根据气候和土壤类型查表获得), F_{LU} 为特定土地利用的库变化因子, F_{MG} 为管理制度的库变化因子, F_{I} 为有机质投入的库变化因子, A 为正在被估算的土地面积。

2.1.2 纳入国家特定数据的方法

Tier 2 方法与 Tier 1 相同,但可以根据本国观测数据对这些缺省值进行修正,定义了更详细的管理体系,有更详细的土壤分类和气候带分类,以获取国家特定参考碳库。

土壤有机碳储量变化估算公式:

$$\Delta C = \frac{\sum_{c,s,p} \left[\left\{ (\text{SOC}_{\text{参考},c,s,i} \times F_{\text{LU},c,s,i} \times F_{\text{MG},c,s,i} \times F_{\text{I},c,s,i} \times A_{c,s,i})_0 - (\text{SOC}_{\text{参考},c,s,i} \times F_{\text{LU},c,s,i} \times F_{\text{MG},c,s,i} \times F_{\text{I},c,s,i} \times A_{c,s,i})_{(0-T)} \right\} \times A_{c,s,p} \right]}{D} \quad (5)$$

式中, P 为地块。本方法结合土地利用转移矩阵,以地块为基本单元计算各地块上的碳库变化,并可估算每个连续年之间的碳储量变化,计算结果更为精确。

2.1.3 高级估算方法

Tier 3 是利用经校准和验证的过程模型或者高密度网络监测数据对土壤有机碳变化进行估计^[21]。在定量框架下,捕捉引起土壤中碳增加和损失的基础过程,如土地利用和管理措施对控制来自植物生产及枯枝落叶和微生物分解的碳投入过程的影响,即可采用过程模型,排放因子作为模型参数,以及具有基于地理信息的活动水平数据。方法三的建模方法能够对与土地利用和管理活动相关的碳库变化提供更准确的估算值。

国内外采用 IPCC 制定的方法进行土壤碳库变化估算的研究已有很多,但多集中于采用 Tier 2 的方法进行农田管理土壤碳汇量的估算。应用于草地生态系统的估算则相对较少,仅有我国学者^[21]依据 Tier 2 的方法估算出 2000—2007 年锡林郭勒盟草地土壤有机碳库的变化,美国学者 Ogle 等^[22]在 IPCC 制定的碳估算方法基础上,探究并修订特定的草地管理因子,并据此估算出不同管理措施下的固碳潜力等。究其原因,在于 IPCC 提供的 Tier 1 方法过于简略,准确性较低;Tier 2 纳入区域特定数据进行分析,相对准确,而学者用于草地的固碳量估算一般采用样点或区域尺度上的一般估算方法,因此并未被广泛采用;Tier 3 对数据要求较高,不易实现。

2.2 草地生态系统土壤固碳量的一般估算方法

2.2.1 样点尺度

样点尺度固碳量估算方法通常有两种,即碳储量变化法和碳通量法^[23]。

(1) 碳储量变化法 利用实验小区不同时期测定的土壤碳储量的差值估算这段时期内的土壤碳变化。通常依据草地生态系统在固碳措施实施前后的土壤有机碳储量差值,来估算该管理措施的固碳量。该方法需要收集草地管理措施实施前、后某一刻的碳密度数据,是估算草地土壤固碳量最常用的方法。计算公式如下:

$$\Delta \text{SOC} = (\text{SOC}_{D_T} - \text{SOC}_{D_0}) \times A \quad (6)$$

式中, ΔSOC 为草地土壤碳储量变化量 (Mg C); SOC_{D_0} 、 SOC_{D_T} 分别表示实施固碳措施前和实施 T 年后的土壤有机碳密度 ($\text{Mg C}/\text{hm}^2$); A 为实施固碳措施的草地面积 (hm^2)。

(2) 碳通量法 通过测定草地生态系统在固碳措施实施期间的 CO_2 通量变化量来估算该管理措施的固碳量。该方法需要基于涡度相关仪等测量或模型模拟得到固碳措施实施期间的草地年碳收支状况^[24]。计算公式如下:

$$\Delta \text{SOC} = A \times (G - L) \times T \quad (7)$$

式中, ΔSOC 为草地生态系统土壤有机碳储量变化量 (Mg C); G 和 L 分别为草地生态系统年均碳吸收量和损失量 ($\text{Mg C}/\text{hm}^2 \text{ a}^{-1}$); T 为固碳措施实施年限; A 为实施固碳措施的草地面积 (hm^2)。

从草地生态系统自然演替过程中植被土壤碳积累过程来看,碳储量变化法与碳通量法在本质上是一致的,两者均可用于草地固碳量的估算,区别仅在于数据类型获取的不同。如果能够获得足够的数据库支持,同一

研究区相同背景下两种方法计算的固碳量理应是相等的。

2.2.2 区域尺度

以往对固碳量的估算多集中在样点和生态系统小尺度上,而随着国际气候变化大会的召开以及碳贸易的发展,区域尺度生态系统固碳量的估算越来越受到政府和专家学者的重视。区域尺度上的土壤固碳量估算方法主要包括统计模型、清查法、经验模型、土壤有机质机理模型及基于 GIS 的机理模型等(表 2)^[25]。

表 2 区域尺度土壤固碳量估算方法比较
Table 2 Compares of estimation methods of regional soil carbon sequestration

估算方法 Estimation methods	特点 Characteristics	不足 Shortcomings	适用性 Applicability
简易统计模型 Simple statistical model	小尺度结果上推或通过建立固碳量与影响因子的统计模型;简易计算	估算精度受观测样点数量影响;结果精度低	在缺少详细数据的情况下可作区域土壤固碳量的初步估算
传统清查法 Traditional inventory method	利用不同时期的土壤数据库估算期间的土壤固碳量,如利用我国二次土壤普查数据;应用广泛,结果较可靠	估算精度受数据代表性及其空间分布的均匀性影响;需要长期大量的数据积累	在大量数据支持下,是一种对历史碳变化估算较为简单且较准确的方法
经验模型 Empirical model	IPCC Tier2 方法或簿记模型;较好地考虑了土壤碳变化的影响因素	无法从机理上解释固碳;用缺省的土地管理因子等估算,精度较低	可初步对区域、国家或全球尺度碳排放清单进行估算
一般机理模型 Traditional Mechanism model	Roth C 模型、CENTURY 模型等土壤有机质机理模型;预测未来碳动态	模型参数较多;需要长期定位观测的样点数据进行检验;模型结果空间化精度较低	可对不同情景下的样点固碳量进行估算
基于 GIS 的机理模型 Mechanism model basing GIS	GEFSOC 区域模型、耦合土地利用模型和土壤有机质模型的综合模型(HILLS)等;预测未来碳格局	模型参数较多;需要样点数据进行检验;同时需要空间信息数据格局	目前发展最快的方法,代表区域尺度土壤固碳量估算方法的最新进展

采用上述方法进行区域土壤固碳量估算的成果已有很多。Xie 等^[26]利用我国第二次土壤普查数据和近年发表的论文数据,估算了我国过去 20a 草地土壤固碳量为-3.56Pg C;Houghton 等^[27]首次提出簿计模型,用于估算土地利用变化产生的碳排放量,之后,随数据类型增加和数据获取精度的提高,该模型被进一步完善,并对不同国家或地区以及全球尺度的生态系统碳变化量进行了估算^[28],该模型估算出中国过去 300 年间(1700—2000 年)土地利用变化产生的碳损失进行了估算,结果约为 17—33 Pg C,而同期美国^[29]的碳损失约为 25 Pg C;Falloon 等^[30]应用 RothC 模型并结合 GIS 模拟未来 100 年内欧洲全部耕地转变为林地的土壤固碳量为 0.49 Tg C。Ardö 等^[31]在 GIS 平台下,利用 Century 模型对苏丹半干旱地区 1900—2100 年间的碳变化量进行了估算,发现该地区在 1900—2000 年间表层(20cm)土壤固碳量为-6.8 Tg C,2000—2100 年固碳量为 17 Tg C;Easter 等^[32]人在 GIS 平台下将 CENTURY 模型、RothC 模型和 IPCC 的 Tier2 方法综合为一个所谓的区域模型,称为 GEFSOC(Global Environment Facility Soil Organic Carbon)模型,目前该模型已被应用于多个地区的碳动态估算^[33-34]。

在众多估算方法中,运用土壤碳循环机理模型研究土壤固碳潜力,成为国际上陆地生态系统固碳与温室气体减排潜力评估的主要途径,该方法主要是根据土壤碳循环过程与机理建立土壤有机碳水平的表征、评估或预测模型,然后根据影响因素或管理实践的变化作为情景分析来估计、评估和预测区域或国家尺度的土壤固碳潜力与前景^[35]。2004 年,联合国粮农组织 FAO 的会议报告中,提供了不同土地利用系统下,估算地上和地下碳库储量的方法。同时描述了很多土地利用和土地管理情景下达到双赢的途径,还提出了在当前土地利用类型(LUT)和未来潜在土地利用格局(PLUT)下,利用各种模型模拟碳动态、估算碳截获的方法^[36]。其指

出基于长期观测实验的土壤有机质模型,包括 RothC、CENTURY、DNDC、EPIC、NCSOIL 等机理模型。许多国家已应用不同的模型模拟研究了草地生态系统碳截获潜力^[37-38]。利用模型法研究草地生态系统土壤固碳潜力的概念模型见图 2。

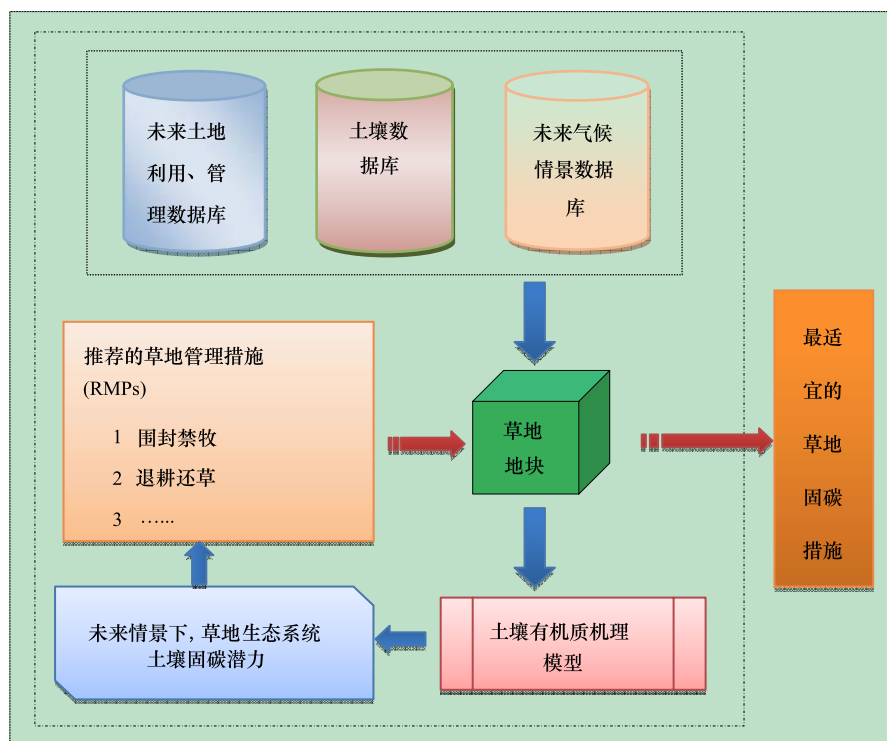


图 2 草地生态系统固碳潜力概念模型

Fig.2 Conceptual model of carbon sequestration potential in grassland ecosystem

3 草地土壤固碳影响因素及固碳措施

3.1 草地生态系统土壤固碳的影响因素

土壤有机碳固定受气候、植被、土壤理化特性以及人类活动等诸多物理、生物和人为因素交互作用的影响。分析各种因子对土壤有机碳的影响,是准确预测土壤有机碳在全球变化情景下大气 CO₂ 的源/汇方向及准确评估碳收支的关键。根据不同学者对自然及人为因素对草地生态系统土壤碳截获影响机制的研究,总结见表 3。

影响草地土壤固碳的自然因素主要包括温度、降水等气候因子及大气 CO₂ 浓度等。根据王淑平等^[50]对包括东北草甸草原、内蒙古高原草甸草原、典型草原、荒漠草原在内的 IGBP 中国东北样带 (NECT) 的研究表明:土壤有机碳含量与降水量之间呈显著正相关,温度对有机碳的影响较复杂,适宜的温度有利于土壤有机碳的积累,否则对有机碳的积累具有负效应。长期 CO₂ 浓度的升高,利于促进光合同化,减缓有机质分解,增加碳截获。

人文因素主要包括开垦、放牧、烧荒、围栏、施肥、灌溉、引种、补播及松土改良等土地利用和土地管理措施。其中开垦、烧荒等不良的管理措施,减少碳素向土壤输入,增强有机质分解,破坏土壤颗粒有机碳,不利于碳固定;围封、补播、引种等有效的管理措施,减缓土壤有机质分解,利于增加碳截获;放牧、施肥等管理措施,对土壤碳固定的影响较为复杂,受到实施年限、实施强度等的影响。

3.2 不同管理措施下草地固碳潜力

围栏、禁牧、补播是 3 种最基本的草地有效管理措施,由于减少了牲畜对土壤的践踏和人为扰动,土壤质量得到了恢复,地上生物量也得到了提高,有利于各草地类型对有机碳的累积。通过对不同管理措施下我国

草地土壤固碳潜力(表 4)^[51]总结可以看出,高寒草甸补播的固碳潜力最大,达到 1.26 t C hm⁻² a⁻¹),温性草原补播的固碳潜力次之,年固碳率为 1.07 t C hm⁻² a⁻¹;温性草甸草原通过围封草场实现的碳截获潜力最大,达到 0.68 t C hm⁻² a⁻¹;放牧管理中轻度放牧能适当增加温性荒漠草原碳截获。除杂、施肥、翻耕、防火管理等推荐的管理措施(RMPs),均可有效的促进草地土壤碳截获。草地管理强度及管理年限对不同深度土层土壤有机碳影响的研究也引起众多专家学者的关注。

表 3 自然因素和人为因素对草地土壤有机碳固定的影响

Table 3 Natural and human factors influencing grassland organic carbon sequestration

影响因素 Factors		影响结果 Effects	影响机理 Influence mechanism
自然因素 Natural factors	全球变暖	短期增加	升温能显著促进部分地区的有机碳固定 ^[39]
		长期减少	升温对促进土壤有机质分解的影响比对促进 NPP 积累的影响大 ^[38]
	CO ₂ 浓度升高	短期不变	在促进光同化的同时也促进微生物活性和土壤呼吸作用 ^[40]
		长期增加	长期可以减缓有机质分解,增加碳截获 ^[41]
人为因素 Human factors	降水增加	增加	影响土壤透气性,减缓土壤有机质分解 ^[14]
	放牧	减少	过度放牧或长期放牧减少碳素向土壤输入 ^[42]
		不变	短期内轻度放牧下,不影响碳素平衡 ^[43]
		增加	适度放牧有利于土壤化学性状的保持和提高,可加速凋落物分解 ^[44]
		增加	减少土壤有机质分解,增加碳截获 ^[45]
	开垦	减少	减少碳素向土壤输入;有机质分解和土壤侵蚀活动增强;开垦破坏了土壤颗粒有机碳和土壤团聚体 ^[46]
	施肥	减少	改变了土壤有机质的溶出作用 ^[47]
		不变	碳素输入与输出相平衡 ^[48]
	引入优良牧草	增加	氮素输入抑制土壤有机质分解 ^[49]
		增加	具有较高的地上地下生物量和较高的碳密度双重特性 ^[49]

表 4 中国不同草地类型不同管理措施下(0—20 cm)土壤固碳潜力(t C hm⁻² a⁻¹)及差异显著性分析

Table 4 The sequestration potential(t C hm⁻² a⁻¹) and the significance of difference of SOC by grassland managements in different types of grassland of China

草地类型 Grasslands	轻牧 Light grazing	中牧 Moderate grazing	重牧 Heavy grazing	过牧 Over grazing	禁牧 Forbidden grazing	补播 Resowing	围栏 Exclosure
高寒草甸草原 Alpine meadow	-1.35 a	-3.00 ab	-3.75 ab	-5.62 b	0.56 a	1.26 a	
高寒草原 Alpine steppe	-1.76 a	-0.85 a	-3.62 a	-2.36 a	0.04 a		
温性草原 Temperate steppe	-0.41 ab	-0.73 ab	-1.26 bc	-2.40 c	0.12 a	1.07 a	0.37 a
温性草甸草原 Temperate meadow steppe	-1.39 a	-2.92 a	-3.74 a	-2.3 a	0.18 a		0.68 a
温性荒漠草原 Temperate desert steppe	0.04 a	-0.42 ab	-0.52 ab	-0.85 b	0.68 a		0.28 a
山地草甸 Mountain meadow				-5.16 a			2.23 b
暖性灌草丛 Warm shrub-grassland	-1.94 b	-1.36 b	-1.50 b			0.64 a	

同行不同字母表示各草地类型不同管理措施之间差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)

围封作为最简单有效的草地管理措施,在减缓侵蚀并恢复土壤的养分含量方面发挥重要作用。瞿王龙等^[45]研究了阿拉善荒漠草地围封恢复对土壤有机碳的影响,结果表明 0—10 cm 土层中有机碳含量显示为围封 6a(2.17 g/kg)>围封 2a(1.79 g/kg)>自由放牧(1.72 g/kg),10—20 cm 土层土壤有机碳含量随恢复时间略

有增加,但无显著性差异。尚雯等^[52]以流动沙丘为对照,研究了不同围封年限下科尔沁退化沙质草地表层(0—15 cm)土壤有机碳的变化,结果表明 14a 和 26a 围封样地 SOC 含量随围封年限的增加而增加,且 0—5 cm 层增幅高于 5—15 cm 土层。敖伊敏等^[53]以内蒙古典型草原为研究对象,对重度退化草地采取生长季围封措施后土壤有机碳含量显著高于自由放牧地,且随围封年限的增加呈上升趋势,均在围封 14a 样地出现最大值,之后随着围封年限的继续增加又出现降低趋势。不同围封年限草地土壤有机碳含量由表层向下层呈下降趋势,与围封年限呈极显著正相关关系。不同草地类型不同围封年限对不同深度层土壤有机碳固定的复杂影响,仍是未来专家学者的研究重点。

补播是在不破坏或少破坏原有植被的情况下,在草群中播种一些适应当地自然条件的、有价值的优良牧草,以增加草群中优良牧草种类成分和草地的覆盖度,达到提高草地生产力和改善土壤质量的目的。由于草地补播可显著提高地上生物量,进而为草地土壤有机碳固定提供了大量的地上碳源,成为了退化草地进行人工改良的重要措施之一^[54]。随着植被的恢复,土壤团聚体活性有机碳含量提高并趋于稳定,土壤碳汇效应有可能增强。因此,发展人工草地可以显著加快植被的自然演替过程,利于植被的恢复与重建,具有良好的生态效益^[55]。

放牧是草地最基本的管理方式,不同放牧强度及放牧时间对不同土层土壤有机碳的复杂影响研究一直是专家学者的研究重点之一。有关研究表明,放牧不总是减少碳储量,禁牧也不总是增加碳储量,而与放牧强度、放牧时间及畜牧承载量等有关。Schuman 等^[44]指出,牛羊的踩踏加速了地表凋落物的物理分解,提高了地表凋落物的分解速率,促进了碳素由地上部分向土壤的转移。刘楠等^[56]研究了内蒙古锡林河流域羊草典型草原不同放牧强度及放牧制度下土壤有机碳的含量差异,结果表明土壤有机碳含量大体表现为常年放牧地高于混合放牧地,且差异明显。常年放牧地表现为轻牧>重牧>中牧>围封未放牧地,且土壤有机碳含量随着土层深度的增加而降低。Reeder 等^[57]通过对科罗拉多州东北部短草草原 56a 不同放牧强度对土壤碳影响的研究表明,重度放牧地土壤有机碳含量要高于未放牧地 7.5 Mg/hm²。在不同的放牧强度下去寻求一个合理的平衡点适度放牧,能维持草地的可持续管理,减少草地碳排放,增加土壤碳储存。

4 结语

在全球气候变化的背景下,固碳潜力的定量估算、固碳过程和固碳机理的研究已然成为当今前沿领域。如何因地制宜地采取固碳措施以增加草地碳截获,减缓全球气候变化,成为科学家们的研究焦点。近年来,国内外关于草地土壤固碳潜力估算的研究已从样点尺度发展到区域尺度,从简单统计模型发展到基于 GIS 的碳循环机理模型。联合国 IPCC 为准确量化碳收支过程,发布温室气体清单指南,统一土壤固碳的估算方法,这对国家或全球层面的碳估算及碳循环研究都有一定的意义。然而,目前关于土壤固碳潜力的估算因土壤碳密度空间变异性及基础数据获取、估算方法、研究尺度等方面的不同而存在较大差异。关于区域尺度草地土壤固碳潜力的定量认证科学研究,缺乏国际公认的草地碳收支及其固碳潜力计量和认证体系。在草地土壤固碳潜力的模型研究上,模型开发的方法学、模型适用性与参数修正、模型空间尺度评估的不确定性研究,区域内有机碳含量的空间变异性、尺度效应与因素效应,气候变化和土地利用变化情景下碳动态变化趋势等问题成为草地土壤固碳潜力宏观研究的主要内容。对于不同因子对草地土壤固碳的复杂影响、不同固碳措施及其固碳潜力,还需要系统性的科学观测、长期定位实验研究和区域基础数据的支持。

世界范围内的草地土壤固碳研究已经进入一个快速发展时期,相信不久的将来,人类将能够深入揭示固碳过程和机理,确定温室气体源汇强度,增加草地碳截获,并为全球的碳减排行动提供有效的理论和技术支持。未来我国关于草地生态系统土壤固碳的研究重点包括:①加强碳循环模型在固碳潜力估算方面的开发与应用,尤其开发适用于中国特定草地生态系统的碳循环模型;②强化 RS、GIS 和 GPS 等技术在土壤生态系统碳平衡研究中的应用,模拟大尺度的固碳过程,以实现土壤固碳的时间和空间分布格局的快速诊断与评估;③着重研究草地土壤固碳的过程和机理,加强对土壤有机碳物理保护、碳化学结合与转化、团聚体的形成与更

新等的固碳机理研究,以明确草地土壤固碳的过程;④注重固碳与环境效应之间的关系,以及土地利用与土地覆盖变化对草地生态系统土壤固碳的影响;⑤建立具有一致性和普遍性相结合的土壤有机碳储量及潜力的估算方法,克服不同研究之间的差异,降低计算结果不确定性;⑥探寻因地制宜的固碳措施。在协调自然环境与社会、经济发展的基础上,考虑技术上和经济上的可行性,探寻适合不同草地生态系统的低成本的有效固碳措施,进而为减缓气候变化,促进经济、社会、环境的协调发展服务。

参考文献 (References):

- [1] 孙成权, 曲建升. 国际地球科学发展态势. 地球科学进展, 2002, 17(3): 344-347.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 1-22.
- [3] Zhang J B, Song C C. The sensitive evaluation indicators of effects of land-use change on soil carbon pool. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4): 500-504.
- [4] Watson R T, Nobel I R, Bolin B, Ravindranath N H, Verardo D J, Dokken D J. Land use, land-use change and forestry: a special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 388-388.
- [5] 李凌浩, 陈佐忠. 草地生态系统碳循环及其对全球变化的响应 I. 碳循环的分室模型、碳输入与贮量. 植物学通报, 1998, 15(2): 14-22.
- [6] Bolin B. Changes of land biota and their importance for the carbon cycle. *Science*, 1977, 196(4290): 613-615.
- [7] Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40(3): 468-470.
- [8] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [9] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 1990, 348(6298): 232-234.
- [10] Lal R, Kimble J M, Follett R F, Stewart B A. *Soil Processes and the Carbon Cycle*. Boca Raton: CRC Press, 1997: 405-425.
- [11] Titlyanova A A, Bulavko G I, Kudryashova S Y, Naumov A V, Smirnov V V, Tanasienko A A. The reserves and losses of organic carbon in the soils of Siberia. *Eurasian Soil Science*, 1998, 31(1): 45-53.
- [12] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展. 中国沙漠, 2002, 22(3): 220-228.
- [13] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 张旭辉. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展. 土壤学报, 2007, 44(2): 327-337.
- [14] 张志丹, 杨学明, 李春丽, 赵兰坡, 周雅娟, 于博. 土壤有机碳固定研究进展. 中国农学通报, 2011, 27(21): 8-12.
- [15] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2008, 6(3): 317-327.
- [16] 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.
- [17] Sperow M, Eve M, Paustian K. Potential soil C sequestration on US agricultural soils. *Climatic Change*, 2003, 57(3): 319-339.
- [18] 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.
- [19] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [20] Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K. 2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories // Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japan, IGES, 2006.
- [21] 付友芳, 于永强, 黄耀. 2000-2007 年内蒙古锡林郭勒盟草地土壤有机碳变化估计. 草业科学, 2011, 28(9): 1589-1597.
- [22] Ogle S M, Conant R T, Paustian K. Deriving grassland management factors for a carbon accounting method developed by the intergovernmental panel on climate change. *Environmental Management*, 2004, 33(4): 474-484.
- [23] 常瑞英, 唐海萍. 草原固碳量估算方法及其敏感性分析. 植物生态学报, 2008, 32(4): 810-814.
- [24] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环. 北京: 气象出版社, 2002.
- [25] 常瑞英, 刘国华, 傅伯杰. 区域尺度土壤固碳量估算方法评述. 地理研究, 2010, (9): 1616-1628.
- [26] Xie Z B, Zhu J G, Liu G, Cadisch G, Hasegawa T, Chen C M, Sun H F, Tang H Y, Zeng Q. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, 2007, 13(9): 1989-2007.
- [27] Houghton R A, Hobbie J E, Melillo J M, Moore B, Peterson B J, Shaver G R, Woodwell G M. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: A net release of CO₂ to the atmosphere. *Ecological Monographs*, 1983, 53(3): 235-262.
- [28] Houghton R A, Hackler J L. Sources and sinks of carbon from land-use change in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 1034.
- [29] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The U.S. carbon budget: contributions from land-use change. *Science*, 1999, 285(5427): 574-578.
- [30] Falloon P D, Smith P, Smith J U, Szabó J, Coleman K, Marshall S. Regional estimates of carbon sequestration potential: linking the Rothamsted carbon model to GIS databases. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27(3): 236-241.
- [31] Ardö J, Olsson L. Assessment of soil organic carbon in semi-arid Sudan using GIS and the CENTURY model. *Journal of Arid Environments*, 2003, 54(4): 633-651.
- [32] Easter M, Paustian K, Killian K, Williams S, Feng T, Al-Adamat R, Batjes N H, Bernoux M, Bhattacharyya T, Cerri C C, Cerri C E P, Coleman K, Falloon P, Feller C, Gicheru P, Kamoni P, Milne E, Pal D K, Powlson D S, Rawajfih Z, Sessay M, Wokabi S. The GEFSOC soil carbon modelling system: a tool for conducting regional-scale soil carbon inventories and assessing the impacts of land use change on soil carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 122(1): 13-25.
- [33] Milne E, Al Adamat R, Batjes N H, Bernoux M, Bhattacharyya T, Cerri C C, Cerri C E P, Coleman K, Easter M, Falloon P, Feller C, Gicheru P, Kamoni P, Killian K, Pal D K, Paustian K, Powlson D S, Rawajfih Z, Sessay M, Williams S, Wokabi S. National and sub-national assessments of soil organic carbon stocks and changes: The GEFSOC modelling system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 122(1):

- 3-12.
- [34] Falloon P, Jones C D, Cerri C E, Al-Adamat R, Kamoni P, Bhattacharyya T, Easter M, Paustian K, Killian K, Coleman K, Milne E. Climate change and its impact on soil and vegetation carbon storage in Kenya, Jordan, India and Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 122(1): 114-124.
- [35] Eve M D, Sperow M, Howerton K, Paustian K, Follett R F. Predicted impact of management changes on soil carbon storage for each cropland region of the conterminous United States. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(4): 196-204.
- [36] Ponce-Hernandez R, Koohafkan P, Antoine J. Assessing carbon stocks and modelling win-win scenarios of carbon sequestration through land-use changes. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2004: 156-156.
- [37] Jones C, McConnell C, Coleman K, Cox P, Falloon P, Jenkinson D, Powlson D. Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil. *Global Change Biology*, 2005, 11(1): 154-166.
- [38] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, Schimel D S, Hall D O, Coughenour M B, Garcia Moya E, Gilmanov T G, Kamnalrut A, Kinyamario J I, Kirchner T, Kittel T G F, Menaut J C, Sala O E, Scholes R J, van Veen J A. Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide. *Global Change Biology*, 1995, 1(1): 13-22.
- [39] Cao M, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 185-198.
- [40] 陈春梅, 谢祖彬, 朱建国. 大气 CO₂ 浓度升高对土壤碳库的影响. *中国生态农业学报*, 2008, 16(1): 217-222.
- [41] Verburg P S J, Gorissen A, Arp W J. Carbon allocation and decomposition of root-derived organic matter in a plant-soil system of *Calluna vulgaris* as affected by elevated CO₂. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(10/11): 1251-1258.
- [42] Derner J D, Boutton T W, Briske D D. Grazing and ecosystem carbon storage in the North American Great Plains. *Plant and Soil*, 2006, 280(1/2): 77-90.
- [43] Raiesi F, Asadi E. Soil microbial activity and litter turnover in native grazed and ungrazed rangelands in a semiarid ecosystem. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 43(1): 76-82.
- [44] Schuman G E, Reeder J D, Manley J T, Hart R H, Manley W A. Impact of grazing management on the carbon and nitrogen balance of a mixed-grass rangeland. *Ecological Applications*, 1999, 9(1): 65-71.
- [45] 瞿王龙, 裴世芳, 周志刚, 张宝林, 傅华. 放牧与围封对阿拉善荒漠草地土壤有机碳和植被特征的影响. *甘肃林业科技*, 2004, 29(2): 4-6.
- [46] Qi Y C, Dong Y S, Liu J Y, Domroes M, Geng Y B, Liu L X, Liu X R, Yang X H. Effect of the conversion of grassland to spring wheat field on the CO₂ emission characteristics in Inner Mongolia, China. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94(2): 310-320.
- [47] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G, Lehman S J, Turnbull J, Bowman W D. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. *Nature*, 2002, 419(6910): 915-917.
- [48] Ünü K, Özenirler G, Yurteri C. Nitrogen fertilizer leaching from cropped and irrigated sandy soil in Central Turkey. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50(4): 609-620.
- [49] Hagedorn F, Spinnler D, Siegwolf R. Increased N deposition retards mineralization of old soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(12): 1683-1692.
- [50] 王淑平, 周广胜, 吕育财, 邹建军. 中国东北样带 (NECT) 土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系. *植物生态学报*. 2002, 26(5): 513-517.
- [51] 石锋, 李玉娥, 高清竹, 万运帆, 秦晓波, 金琳, 刘运通, 武艳娟. 管理措施对我国草地土壤有机碳的影响. *草业科学*, 2009, 26(3): 9-15.
- [52] 尚雯, 李玉强, 韩娟娟, 赵学勇, 张铜会, 罗永清, 王少昆. 围封对流动沙丘表层土壤有机碳, 全氮和活性有机碳的影响. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 147-152.
- [53] 敖伊敏, 焦燕, 徐柱. 典型草原不同围封年限植被-土壤系统碳氮贮量的变化. *生态环境学报*, 2011, (10): 1403-1410.
- [54] 文海燕, 赵哈林, 傅华. 开垦和封育年限对退化沙质草地土壤性状的影响. *草业学报*, 2005, 14(1): 31-37.
- [55] 李裕元, 邵明安, 郑纪勇, 李秋芳. 黄土高原北部草地的恢复与重建对土壤有机碳的影响. *生态学报*, 2007, 27(6): 2279-2287.
- [56] 刘楠, 张英俊. 放牧对典型草原土壤有机碳及全氮的影响. *草业科学*, 2010, 27(4): 11-14.
- [57] Reeder J D, Schuman G E, Morgan J A, Lecain D R. Response of organic and inorganic carbon and nitrogen to long-term grazing of the shortgrass steppe. *Environmental Management*, 2004, 33(4): 485-495.