

doi:10.7515/JEE201601010

# InVEST 模型对锡林郭勒草原碳储量研究的适用性分析

张文华<sup>1</sup>, 贾志斌<sup>1</sup>, 卓义<sup>1,2</sup>, 特古斯<sup>1</sup>, 蒋欣阳<sup>1</sup>

(1. 内蒙古大学 环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 2. 中国农业科学院草原研究所, 呼和浩特 010010)

**摘要:** 锡林郭勒草原是我国四大草原之一, 也是内蒙古主要的天然草场。近年来, 在各种因素影响下, 锡林郭勒草原区生态系统发生重大变化, 导致草原区碳储量也发生改变。本文尝试应用 InVEST 模型中的碳储量模块对 2013 年锡林郭勒草原碳储量进行研究, 从而探究 InVEST 模型在碳储量研究中的适用性。结果表明: (1) 锡林郭勒草原各草地类型的地下碳储量明显多于地上碳储量; (2) 草甸草原碳储量 > 典型草原碳储量 > 荒漠草原碳储量; (3) 应用 InVEST 模型计算不同草地类型地上和地下碳储量, 草甸草原分别为  $196.7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  和  $1385.2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ; 典型草原的分别为  $133.4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  和  $688.9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ; 荒漠草原的分别为  $56.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  和  $301 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。应用 InVEST 模型计算出来的碳储量值与前人采用实地采样得出的结果基本一致, 所以 InVEST 模型对于草原区碳储量的研究具有一定的适用性。

**关键词:** 锡林郭勒草原; InVEST 模型; 碳储量

## Applicability research on carbon storage in the Xilin Gol Grassland by InVEST Model

ZHANG Wenhua<sup>1</sup>, JIA Zhibin<sup>1</sup>, ZHUO Yi<sup>1,2</sup>, Tegusi<sup>1</sup>, JIANG Xinyang<sup>1</sup>

(1. College of Environment and Resources of Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China;  
2. Institute of Grassland Research, Chinese Academy of Agricultural Science, Hohhot 010010, China)

**Abstract: Background, aim, and scope** Xilin Gol Grassland, as one of the four prairies in China, is primary natural grassland in Inner Mongolia. Recently, ecosystem has been undergone great change in this area, on account of the effects of various factors, which lead to change of carbon storage in steppe accordingly. As large carbon storage, grassland plays an important role in terrestrial carbon cycling. Evaluating the carbon storage of grassland ecosystem accurately and its dynamic changes are conducive to predict global climate change, the relationship between grassland ecosystem and sustainable of grassland resources. Due to some factors, application of conventional method for determining the grassland carbon storage are not accurate. Thus InVEST model is used in thesis to attempt to quantitatively evaluate carbon storage of Xilin Gol Grassland in 2013, so as to explore the applicability of InVEST model to study carbon reserve in steppe. **Materials and methods** Compared to

收稿日期: 2015-08-31; 录用日期: 2016-01-10

Received Date: 2015-08-31; Accepted Date: 2016-01-10

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2013MS0506); 中国农业科学院创新工程项目 (CAAS-ASTIP-IGR2015-04)

Foundation Item: Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region (2013MS0506); Innovation Project of Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-ASTIP-IGR2015-04)

通信作者: 卓义, E-mail: zhuoyii@126.com

Corresponding Author: ZHUO Yi, E-mail: zhuoyii@126.com

other models, using carbon storage module in InVEST model to calculate the grassland carbon stocks of Xilin Gol only needs to input the initial spatial data, and then run the module will be able to output a large number of target data. Running the InVEST model to estimate the carbon storage of grassland ecosystem, which needs two basic datas: the current land use and land cover (LULC) and the table of carbon pool. The LULC is raster dataset which interpreted by ArcGIS. The data of carbon pool can be found in some relevant research, also can be extracted in relevant habitats by experiment, if it still can't get relevant data, according to other carbon pool or set the default to 0. The collected data type-in on the basis of carbon model, we can get the aboveground carbon storage, underground carbon storage, soil carbon storage and total carbon storage, on the basis of figure, we can read the related fields of carbon distribution in the study area. **Results** Result show that (1) Through the research to carbon reserve of study area, we can know that, the carbon distribution is closely related to vegetation types, and the underground carbon significantly more than the aboveground, aboveground and underground carbon storage of Meadow steppe are  $196.7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  and  $1385.2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ; aboveground and underground carbon storage of Typical grassland are  $133.4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  and  $688.9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ; aboveground and underground carbon storage of Desert grassland are  $56.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  and  $301 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ . (2) As an important part of grassland vegetation carbon storage, most of the biomass carbon is distributed in underground. The underground carbon distribution and output figure of Xilin Gol Grassland show that the carbon content in study area with  $0\text{—}1400 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ , the distribution of underground biomass carbon is closely related to vegetation types, the carbon storage of the meadow steppe area is highest, the typical grassland area is moderate and desert grassland carbon content at least. (3) The aboveground biomass carbon plays a decisive role in ecosystem productivity. The distribution of carbon still exists great correlation with vegetation types. Meadow steppe carbon reserves is the largest output with  $120\text{—}200 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ; Typical steppe carbon relatively less than meadow on the aboveground, with  $80\text{—}120 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ; Desert steppe carbon is minimum of the aboveground, under  $80 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ . (4) Soil organic carbon pool is the largest of the earth surface ecosystem, its carbon storage has great relationship with vegetation net primary productivity, if vegetation net primary productivity is high, so with carbon storage, the trend of soil carbon reserve is Meadow grassland>Typical steppe>Desert steppe. (5) Grassland total carbon including aboveground carbon, underground carbon and carbon in the soil, the carbon of underground and carbon in soil are big part of grassland carbon. The total carbon of Xilin Gol league with  $20\text{—}2350 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ , and the distribution of carbon is different in different vegetation type areas. The carbon of Meadow steppe with  $850\text{—}2350 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ , the carbon of Typical grassland ranks second, with  $150\text{—}850 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ , due to less vegetation distribution, so the carbon of Desert grassland is less than  $150 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ . **Discussion** Although it is timely and effective to calculate carbon reserve of different vegetation type using InVEST model in study area, but there are some problems, such as the validity and accuracy of the initial data, lack of basic data, and difficult to collect, which affecting the accuracy of the results, thus to establish complete and effective spatial database is an urgent task. **Conclusions** The result of carbon storage calculated by InVEST model is accordance with field sampling by predecessor, showing that InVEST model for the study of carbon storage in grassland area has some applicability. It can not only avoid the complexity and restriction of the field survey, but also verify the applicability of the model. **Recommendations and perspectives** We must make full use of data preparation for researching carbon reserves by InVEST model, on the basis of study area to interpret the image, we can get the LUCC figure accurately. Making full use of InVEST model, can not only calculate the amount of carbon storage accurately, but also avoid the complexity of the field sampling survey, it has a great significance to formulate environmental policy.

**Key words:** Xilin Gol Grassland; InVEST model; carbon storage

草地是地球上广泛分布的陆地生态系统类型之一 (Scurlock and Olson, 2002), 其最大特点就是拥有一个巨大的地下有机碳库。据统计, 草地生态系统中约有 80% 的生物量碳都存储在地下 (Mokany et al, 2005)。草地作为一个巨大的碳库, 在陆地生态系统碳循环中扮演着重要角色 (Fang et al, 2007)。准确评估草地生态系统碳库及其动态变化, 有利于预测全球气候变化、草地生态系统之间的相互关系以及草地资源的可持续利用 (Yang et al, 2010)。

近年来, 很多学者在草地碳循环方面进行了大量研究, 并对草地生物量碳进行估算 (Fisher et al, 1995), 推动了草地生态学的发展。但是由于获取数据和应用方法的不同, 前人探测碳储量主要应用定位监测 (Ma et al, 2010)、样带观测 (Fan et al, 2008) 和国家尺度上的分析 (Piao et al, 2007) 等方法。应用这些方法对草地生态系统碳储量及其动态变化进行定量评估存在一定的弊端, 因为它只是针对某个区域或某个生态组分的草地碳库进行评估, 缺乏对草地生态系统碳库及其变化的整体认识, 从而导致估算结果差别大, 对草地碳储量评估的准确性不高。所以许多学者开始通过建立模型研究生态系统服务的功能及其变化过程, 其中 InVEST 模型的应用在国内外取得了良好的效果 (张斯屿等, 2014)。

应用 InVEST 模型对草原生态系统碳储量进行估算, 可以节省时间、精力和财力, 得到的评估结果也相对客观、准确。InVEST 模型能对评估对象做出直观评估, 评估结果以地图的形式展现出来, 使人一目了然, 摒弃了传统评估方法中收集数据和统计计算等不足。虽然 InVEST 模型受到了国外学者的好评, 但是我国对该模型的应用还相对较少, 所以在应用技术和应用方法上还有待提高。本文以 2013 年锡林郭勒草原区不同草地覆盖层面的碳储量为研究基础, 通过应用 InVEST 模型, 从而判定该模型对于草原区碳储量研究的适用性。

## 1 数据与方法

### 1.1 锡林郭勒草原区概况

锡林郭勒盟位于内蒙古自治区中部, 地处  $41^{\circ}35'—46^{\circ}46'N$ ,  $111^{\circ}09'—119^{\circ}58'E$ , 辖 2 市 9 旗 1 县, 北与蒙古国接壤, 南邻河北省张家口、承德地区, 西连乌兰察布市, 东接赤峰市、兴安盟和通辽市, 是我国东北、华北、西北植被分布的交汇

地带, 具有对外贯通欧亚、区内连接东西、北开南联的重要作用。土地总面积约为  $2.03 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 其中草原总面积约占 95%。地貌以高平原为主体, 兼有多种地貌单元, 海拔在 800—1800 m, 地势南高北低 (巴图娜存等, 2012)。该区域的主要土壤类型有灰色森林土、黑钙土、栗钙土、灰褐土、棕钙土、草甸土、沼泽土以及盐碱土等。作为中国北方典型草原的核心区 (崔庆东等, 2009), 以草地为主体的生态系统中主要的草原类型包括草甸草原、典型草原、荒漠草原。

### 1.2 InVEST 模型

InVEST (The Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Tool) 全称为生态系统服务功能综合估价和权衡得失评估模型 (潘韬等, 2013), 是由美国斯坦福大学、TNC 和世界自然基金会合作联合开发, 目的是为了能够在地图上标出自然景观价值 (Dolan, 2010), 将自然资本纳入到决策体系中, 并将经济因素与环境保护有机结合起来, 从而实现对生态系统服务功能的定量评估, 为世界各地自然资本管理、土地利用规划、生态系统产品供应与生命支持功能的权衡提供科学支撑 (吴哲等, 2013)。

InVEST 模型能将量化的生态系统服务功能以地图的形式表现出来, 可不再用繁琐的计算公式和过多的文字赘述来表达; InVEST 模型相对其他模型而言导入数据量较少, 输出的数据量较大, 并且拥有多个模块, 采用多级设计, 可进行多尺度、多情境的分析 (杨园园等, 2012), 优化了很多复杂问题, 最终使问题得到圆满解决。

很多学者开始应用 InVEST 模型对生态系统服务进行价值评估, 但相对于国内学者而言, 国外的研究人员应用的相对较早。在 InVEST 模型中, 产水量模型、生物多样性模型、碳储存等模块应用的较多, 栖息地风险评估、美学价值评估、授粉等模块由于资源短缺、环境变化及一些限制因素的影响而应用的较少, 但是这些模块仍然有重要的研究和利用价值。

InVEST 模型要在 ArcGIS (简称 GIS) 基础上运行, 操作便捷, 只需要导入初始空间数据, 再运行模块, 便能输出大量的目标数据。以运行碳模型为例, 先设定相关情境, 在导入与目标区域相关的土地利用覆被图和碳库表, 经过碳模型运行之后, 就能输出地上碳储量、地下碳储量、

土壤碳储量以及总碳量。虽然如此,应用 InVEST 模型的同时,也存在一定的问题,如空间基础数据的缺失以及数据收集困难等,所以建立完备的空间数据库是一项亟待解决的任务 (Turner et al, 2003)。

### 1.3 研究数据

运行 InVEST 模型估算草原生态系统碳储量时需要准备两方面的基本数据:当前的土地利用土地覆被 (LULC) 图和碳库表。LULC 图是通过应用 ArcGIS 软件将遥感影像进行解译得到的栅格数据集。遥感数据来源于美国国家航天局 NASA,选择 2013 年的 Landsat 8 数据产品,空间分辨率为  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ ,使用 MRT (MODIS Reprojection Tools) 将下载的 Landsat 数据进行格式转换和重投影,把投影转化为 WG84/Alber Equal Area Conic 投影,利用锡林郭勒盟行政区划边界图裁取锡林郭勒盟 2013 年的栅格图像,在通过应用 ArcGIS 软件对 2013 年的栅格图像进行解译。2013 年土地利用覆被图如图 1 所示,草地类型图如图 2 所示。

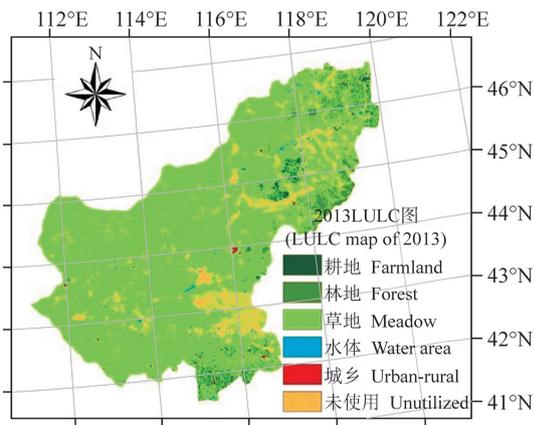


图 1 2013 年土地利用覆被图

Fig.1 The map of land use and land cover of 2013

碳库表是一个关于碳储量的表格,记录在解译的过程中形成的地类中的碳储量。碳存储数据可以在一些相关研究资料中收集,也可以在相关栖息地或区域中通过实验提取分析,如果通过以上数据收集过程还是无法获取相关数据,那么就可以根据其他碳库进行估算或者默认设为 0。本文碳库表中森林、草地和城镇中的数据借鉴 InVEST 模型模板中提供的数据参数,水体、农田和未利用地中的数据是采用相关专业研究人员的实验及

考察而得出的数据。本文主要目的是研究 InVEST 模型对于我国草原区碳储量研究的适用性以及不同地类应用该模型的可行性大小,因此以 InVEST 模型中碳模块为研究对象,对 2013 年锡林郭勒盟草原区碳储量进行研究,2013 年锡林郭勒盟草原区碳库表见表 1。

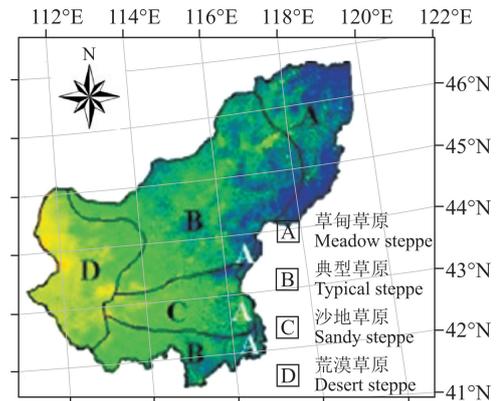


图 2 锡林郭勒草地类型图

Fig.2 Grassland type map of Xilin Gol

## 2 结果与分析

### 2.1 草原地下生物量碳

地下生物量碳是指存在于草地植被地表以下草本根系和根茎中的生物量总和 (黄德华等, 1988)。地下生物量碳是草地植被碳储量的重要组成部分,草地植被的大部分生物量都分配在地下,地下部分对草地植被碳储量贡献具有举足轻重的地位 (胡中民等, 2005)。上世纪 60 年代,朱宗元就开始对荒漠草原地下生物量的空间分布进行研究 (吴征镒, 1980)。杨福囤 (1988) 也对草甸及高山草地地下生物量分布进行了研究。国内外许多研究结果表明,草地的地下生物量大部分存在于表层土壤之中,随着土层深度的增加,生物量逐渐降低,呈“T”型或倒三角形分布 (陈佐忠等, 1988)。目前人们应用很多方法对地下生物量碳进行研究,但是每个方法都有相应的不足之处,而且没有明确的研究方法和流程,人力、财力和时间消耗较大 (杨婷婷等, 2013)。

图 3 是 2013 年锡林郭勒草原地下生物量碳的分布及产量图,碳含量为  $0-1400\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,最大值分布在东部的草甸草原区。综合图 2 (张圣微等, 2008) 草地类型图和地下生物量碳分布图可知,地下生物量碳的分布与植被类型有关。在草地类

型图中草甸草原分布的区域, 地下碳含量相应较高, 为 650—1400 g·m<sup>-2</sup>; 典型草原分布的区域,

碳含量相对较少, 为 350—650 g·m<sup>-2</sup>; 而荒漠草原的碳含量最少, 在 350 g·m<sup>-2</sup> 以下。

表 1 碳库表  
Tab.1 The table of carbon pool

土地利用覆被 LULC	土地利用类型 Land use type	地上碳 Aboveground carbon	地下碳 Underground carbon	土壤碳 Soil carbon
1	森林 (Forest)	140	70	65
2	草地 (Meadow)	15	35	30
3	水体 (Water area)	10	4	5
4	城乡 (Urban-rural)	5	5	15
5	农田 (Farmland)	30	25	28
6	未利用地 (Unutilized)	2	1	2

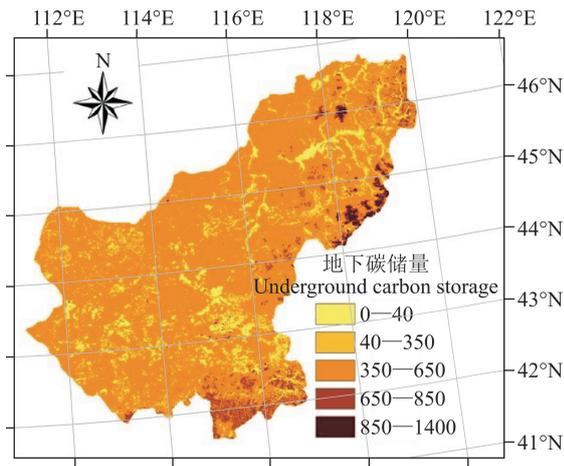


图 3 2013 年锡林郭勒盟地下碳储量  
Fig.3 The underground carbon storage of Xilin Gol League in 2013

### 2.2 草原地上生物量碳

相比地下生物量碳的研究, 人们对地上生物量碳的研究更多, 经历的时间更长, 覆盖范围更广, 积累并记录了大量的文献资料。地上生物量碳包括植物活体和枯落物两部分, 活体是植物的绿色部分 (徐霞等, 2010), 枯落物包括立枯物和凋落物。立枯物是指植物由于自然衰老、机械损伤或干枯而死亡的部分, 死后不脱落而以立枯的形式存在; 凋落物是自然脱落或者由于外力作用而脱离植物体落在土壤表面的死物质 (孙刚等, 2009)。

地上生物量碳是研究草地生态系统功能的主要内容之一, 对生态系统生产力具有决定性的作用。图 4 为 2013 年地上生物量碳分布及产量图。从图中可知, 地上碳储量的分布与植被类型仍存在很大

的相关性。参照草地类型图可知, 在草甸草原分布的地方, 碳储量最大, 产量在 120—200 g·m<sup>-2</sup>, 因为草甸草原区植被旺盛, 相对枯落物也较多, 所以地上碳储量也相应较大; 地上碳储量的分布规律与地下碳储量的分布规律一致, 典型草原区地上碳储量较草甸草原区少, 处于 80—120 g·m<sup>-2</sup>。荒漠草原区的地上碳储量最低, 在 80 g·m<sup>-2</sup> 以下。

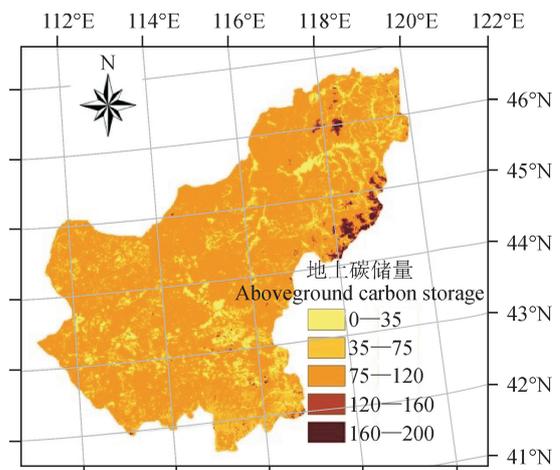


图 4 2013 年锡林郭勒盟地上碳储量  
Fig.4 The aboveground carbon storage of Xilin Gol League in 2013

### 2.3 草原土壤碳储量

土壤中的碳是陆地生态系统碳的重要组成部分, 主要包括土壤有机碳 (SOC) 和土壤无机碳 (SIC)。土壤有机碳库作为地球表层生态系统中最大的碳库, 约是大气碳库的 2 倍 (Lal, 1999)。国内外对土壤有机碳的研究较早, 但主要是偏重对肥力特征的定性和定量研究。陆地土壤有机碳主要分布在 1 m 以内的地表土壤中, 但深

层土壤中的有机碳含量较地表的稳定 (Scharpenseel et al, 1989)。草地生态系统中的土壤碳储量与土壤微生物作用和植物残体累积密切相关。草地土壤有机碳输入的主要途径是植物根系残体和植物地表凋落物, 其中植物根系残体是土壤有机碳的主要来源 (金锋等, 2000), 而土壤微生物的分解作用决定土壤有机碳的输出量大小。植物残体的蓄积和微生物的分解作用共同决定土壤碳含量的多少。

图 5 为 2013 年土壤碳储量图, 土壤碳储量呈现出草甸草原 > 典型草原 > 荒漠草原的分布趋势。草原碳储量与植被净初级生产力有密切的关系, 净初级生产力的在某种程度上决定碳储量的多少, 植被生产力大则碳储量也相对较高。根据前人的研究可知, 草甸草原的生产力大于典型草原, 典型草原的大于荒漠草原, 所以草原碳储量也呈草甸草原 > 典型草原 > 荒漠草原的梯度分布。

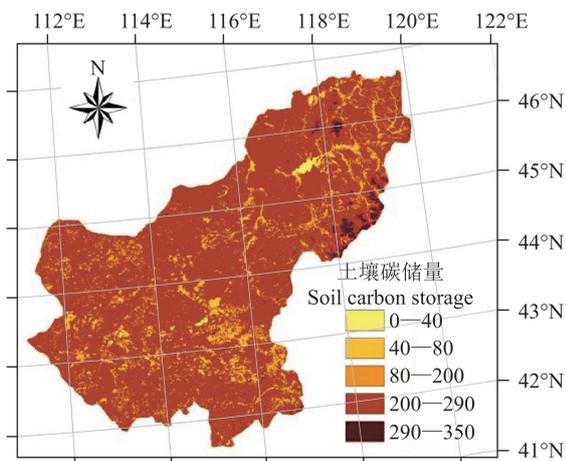


图 5 2013 年锡林郭勒盟土壤中的碳  
Fig.5 The soil carbon storage of Xilin Gol League in 2013

## 2.4 草原总碳储量

草原总碳储量包括地上生物量碳、地下生物量碳和土壤中的碳, 其中, 地下生物量碳和土壤中的碳占草原碳储量的绝大部分。方精云等 (1996) 通过对草原碳储量的研究, 认为我国草地土壤有机碳储量占草原生态系统总碳储量的 96.6%, 且近些年来, 我国草原碳储量并没有发生显著变化。

应用 InVEST 模型来估算草原碳储量, 只要获得足够详细的 LULC 图和碳库表, 运行模型软件就可以获得碳储量图, 并可以在图中读出碳的分布情况以及某一地域的碳储量。如图 6 所示, 锡

林郭勒盟全年总碳储量为 20—2350  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 总碳储量在不同的植被类型区的分布量也不尽相同。草甸草原的碳储量在 850—2350  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  波动变化, 由于草甸草原在各土壤层面上的碳含量都较高, 所以总碳储量也较高。典型草原的碳储量位居第二, 为 150—850  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。荒漠草原由于植被分布较少, 土壤养分不足, 所以生长的植被相对较少, 部分土地是裸露的、贫瘠的, 所以碳含量明显减少, 总碳储量低于 150  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

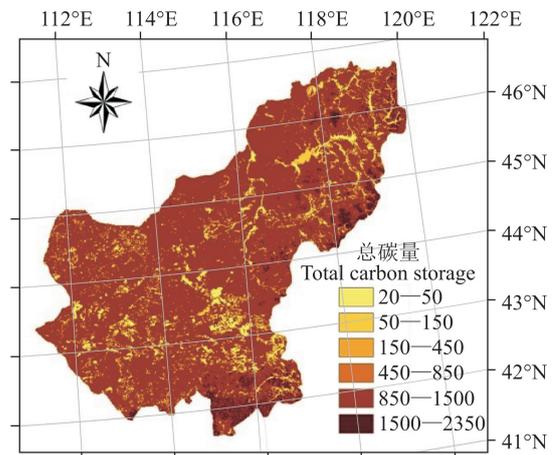


图 6 2013 年锡林郭勒盟总碳储量  
Fig.6 The total carbon storage of Xilin Gol League in 2013

## 2.5 影响因素

根据国内外参考文献, 影响草地生物量碳的因素主要有气候、生物多样性、土壤含水量、盐碱化程度以及放牧方式和土地利用等。由于不同类型草地建群种的生活差异和气候条件不同, 导致不同类型草地产草量的季节变化也不尽相同 (杨婷婷等, 2013)。水热因子能够影响牧草返青时间和产草量, 但温度是决定牧草返青早晚的主要限制因子, 降水量能够决定群落生物量的高低 (白永飞等, 1994)。近年来, 由于过度放牧和土地利用方式变化等因素的影响, 草地生物量碳发生改变。在草地生态系统中, 影响生物量碳的因子可划分为自然因素和人为因素。

### 2.5.1 自然因素

锡林郭勒盟位于内蒙古偏东, 以温带大陆性干旱、半干旱气候为主, 冬季寒冷, 夏季炎热, 年均气温 1—4  $^{\circ}\text{C}$ 。降水量 150—400 mm, 降雨分布不均, 从东南向西北逐渐递减, 并且大多数集中在 6、7、8 月份, 年际变化较大 (王颖等,

2012)。全年平均风速为  $3.5—5.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

草地生物量碳受自然因素影响较大, 如降水、温度、光照和土壤等因素(王艳芬和汪诗平, 1999), 尤其是降水尤为突出(安尼瓦尔·买买提等, 2006), 但也与温度和土壤养分的可利用性等因素密切相关(Yang et al, 2010)。很多研究表明, 在草地生态系统中, 尤其是在干旱、半干旱区, 水热条件及其组合是影响草地植物生长的主要限制因子(Bai et al, 2004)。马文红等(2008)对内蒙古温带草地的研究证实: 降水对于草地生物量碳的空间变异具有一定的控制作用。即使是在高海拔地区的高寒草地, 降水也是调控生物量的重要因子(Yang et al, 2010), 草原碳密度随着降水量的增加呈显著增加趋势。尽管温度的作用相对较弱, 但在一定程度上也会影响草地群落的生物量(韩彬等, 2006), 温度上升对土壤碳库动态变化的影响可能取决于对草地植被生长和土壤微生物分解作用之间的权衡(Davidson and Janssens, 2006)。一方面, 全球变暖可能加速植物生长, 从而增加对土壤的碳输入量(Fang et al, 2003); 另一方面, 全球变暖会刺激微生物分解, 从而增加土壤向大气的碳输出量(Feng et al, 2008)。草地最终的碳储量与土壤质地等因素也是密切相关的(Yang et al, 2008), 因为土壤质地能决定土壤中碳的持有量和输出量大小, 从而决定最终留在土壤中的碳含量。

根据相关人员的实地考察研究和统计数据来分析, 降水是导致草地生物量变化的主要影响因子, 而生物量是土壤碳库的重要来源(Schenk and Jackson, 2002), 所以降水会影响不同地类的碳储量。人们在对草地生物量进行估算的时候, 往往以当年草地产草量为基础, 所以准确估算草地产草量也可以进一步明确碳储量情况。如图 7 所示, 产草量与降水呈明显的正相关关系, 其走势基本保持一致, 产草量又与碳储量呈正相关关系, 由此可知降水与碳储量也呈正相关性, 所以降水是影响碳储量的一个重要因子。产草量与气温的相关性不明显, 说明在同一地区气温对产草量的影响十分微小, 因而对碳储量的影响也就相对较弱。

### 2.5.2 人为因素

除自然因素外, 放牧、围封、刈割等不同的土地利用方式和草原管理措施等人为因素也会影响草地生物量碳含量(王国杰等, 2005)。相关研究表明:

不同放牧情况会导致草地生物碳储量发生不同程度的变化(樊江文等, 2003)。在内蒙古温带草原增加放牧强度, 草地地上和地下生物量碳都逐渐降低(锡林图雅等, 2009), 因为过度放牧会促使绿色植物向凋落物转化并输入到土壤中, 增加土壤呼吸作用, 加速了碳素向大气的释放, 所以碳含量减少。有研究表明, 过度放牧导致中国草地土壤有机碳损失量最大, 约为  $0.23 \text{ kg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。其中, 重度放牧损失量约为  $0.15 \text{ kg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 中度放牧约为  $0.05 \text{ kg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 而轻度放牧约为  $0.05 \text{ kg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (石锋等, 2009)。此外, 土地利用变化如草地转变为农田等、耕作制度与轮作体系的差异等人类活动也会造成土壤有机碳库的变化, 进而影响土壤有机碳储量(Zhou et al, 2007)。

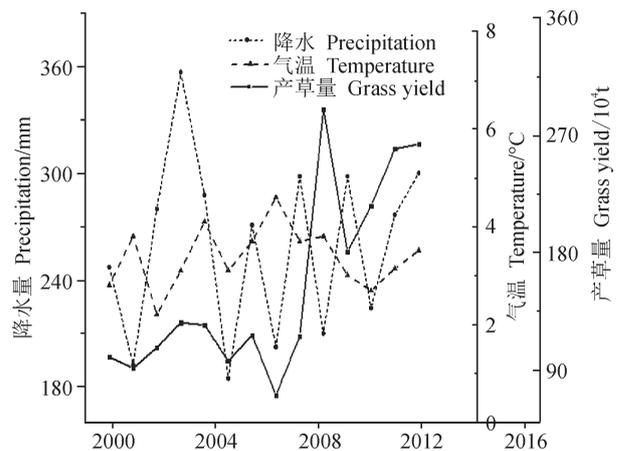


图 7 气温、降水与产草量图

Fig.7 The figure of temperature, precipitation and grass yield

## 3 讨论

通过对锡林郭勒草原碳储量的研究, 基本了解不同草地类型不同土壤层面上碳的分布情况, 从碳储量和分布来看, 基本与前人的研究结果一致。马文红等(2008)通过对内蒙古草地生物量的研究, 认为不同类型草地生物量存在显著差异, 其中草甸草原的生物量最大, 其地上和地下生物量分别为  $196.7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  和  $1385.2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ; 典型草原的生物量居中, 地上和地下生物量分别为  $133.4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  和  $688.9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ; 荒漠草原的生物量最小, 其地上和地下生物量分别为  $56.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  和  $301 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。结合本文通过应用 InVEST 模型计算得出的锡林郭勒草原土壤不同层面上碳的含量及分布情况来看, 碳的分布趋势也是草甸草原碳含量多于典型草原多于荒漠

草原,其中草甸草原地上地下碳含量的分布区间分别为 $160\text{—}200\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $850\text{—}1400\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ;典型草原地上地下碳含量的分布区间分别为 $80\text{—}160\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $350\text{—}850\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ;荒漠草原地上地下碳含量分布区间分别为 $1\text{—}75\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0\text{—}350\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。从上文可以看出,应用InVEST模型得出的结果与前人通过实地调查和实验得出的结果基本吻合,那么InVEST模型中碳储量模块在实际应用中也就相对成熟。

应用InVEST模型虽然能够方便快捷地计算出不同植被类型在不同土地层面上的碳储量,但是在应用模型的过程中需要考虑数据的有效性和准确性,这就需建立完备的空间数据库,才能确保输出结果的真实性和可利用性。本文在应用InVEST模型的过程中,其中碳库表中的某些数据无法通过实验等操作获取,只能根据当地实际情况,请相关专家打分,最后根据打分情况取值,这就在一定程度上影响了结果的准确性,所以建立有效的空间数据库至关重要。

#### 4 结论

草地生态系统是地球上分布面积较广的类型之一(Scurlock and Hall, 1998),巨大的草地面积使得草地在全球碳汇中扮演着十分重要的角色(Mokany et al, 2005)。尽管前人给出了全球平均植被碳密度(Olsen et al, 1983),但由于植被分类系统不同及其他影响因素,难以准确估算温带草原区域的植被碳储量。所以应用InVEST模型对草地生态系统的碳储量进行估算是一个有益的尝试。

通过对锡林郭勒草原碳储量进行研究,发现不同研究层面上的不同草地类型的碳储量不尽相同,究其原因,主要受自然因素和人为因素的影响。自然因素主要有降水量、温度、光照以及微生物降解;人为因素主要包括放牧、刈割、围封、耕作等不同土地利用方式。在这些因素的共同影响下,导致锡林郭勒草原区地上、地下以及土壤碳含量不同。应用InVEST模型得出的碳储量结果与前人通过实地采样对内蒙古草地生物量的计算基本吻合,认为地下生物量明显大于地上生物量,草甸草原地上和地下生物量大于典型草原,典型草原地上地下生物量大于荒漠草原。上述研究结果证实了应用InVEST模型研究草原区碳储量具有较高的准确性和适用性,今后在碳储量的研究中,可以通过应用InVEST进行研究估算,避免实地采样调查的复杂性以及限制性。另一方面,准确了解研究区碳含量,对环境保护以及制定相应的管

理政策也具有十分重要的参考作用。

#### 参考文献

- 安尼瓦尔·买买提,杨元合,郭兆迪,等. 2006. 新疆天山中段巴音布鲁克高山草地碳含量及其垂直分布[J]. *植物生态学报*, 30(4): 545–552. [Mohammad Anwar, Yang Y H, Guo Z D, et al. 2006. Carbon contents and its vertical distribution in alpine grasslands in Bayinbulak, middle stretch of the Tianshan Mountains of Xinjiang [J]. *Journal of Plant Ecology*, 30(4): 545–552.]
- 巴图娜存,胡云锋,艳燕,等. 2012. 1970年代以来锡林郭勒盟草地资源空间分布格局的变化[J]. *资源科学*, 34(6): 1017–1023. [Batunacun, Hu Y F, Yan Y, et al. 2012. The variations and its spatial pattern of grassland changes in Xilinguole from 1975 to 2009 [J]. *Resources Science*, 34(6): 1017–1023.]
- 白永飞,许志信,李德新. 1994. 羊草草原群落生物量季节动态研究[J]. *中国草地*, 3: 1–5. [Bai Y F, Xu Z X, Li D X. 1994. Study on seasonal fluctuations of biomass for *Leymus Chinensis* grassland [J]. *Grassland of China*, 3: 1–5.]
- 陈佐忠,黄德华,张鸿芳. 1988. 内蒙古锡林河流域羊草草原与大针茅草原地下部分生物量与降雨量关系模型探讨[M]//中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究(第2集). 北京: 科学出版社, 20–26. [Chen Z Z, Huang D H, Zhang H F. 1988. Study on the model of interrelation between underground biomass and precipitation of *L. Chinensis* and *Stipa grandis* grassland in Xilin River Basin, Inner Mongolia [M]// Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences. Research on grassland ecosystem (2nd series). Beijing: Science Press, 20–26.]
- 崔庆东,刘桂香,卓义. 2009. 锡林郭勒盟草原冷季牧草保存率动态研究[J]. *中国草地学报*, 31(1): 102–108. [Cui Q D, Liu G X, Zhuo Y. 2009. The preliminary study on dynamic of the grass preservation rates in Xilinguole Grassland in the cold season [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 31(1): 102–108.]
- 樊江文,钟华平,梁颺,等. 2003. 草地生态系统碳储量及其影响因素[J]. *中国草地*, 25(6): 51–58. [Fan J W, Zhong H P, Liang B, et al. 2003. Carbon stock in grassland ecosystem and its affecting factors [J]. *Grassland of China*, 25(6): 51–58.]
- 方精云,刘国华,徐嵩龄. 1996. 中国陆地生态系统的碳库[M]//王庚辰,温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社. [Fang J Y,

- Liu G H, Xu S L. 1996. The carbon stocks of Chinese terrestrial ecosystem [M]// Wang G C, Wen Y P. The concentrations and emission monitoring of greenhouse gas and related processes. Beijing: China Environmental Science Press.]
- 韩彬, 樊江文, 钟华平. 2006. 内蒙古草地样带植物群落生物量的梯度研究 [J]. *植物生态学报*, 30(4): 553–562. [Han B, Fan J W, Zhong H P. 2006. Grassland biomass of communities along gradients of the Inner Mongolia grassland transect [J]. *Journal of Plant Ecology*, 30(4): 553–562.]
- 胡中民, 樊江文, 钟华平. 2005. 中国草地地下生物量研究进展 [J]. *生态学杂志*, 24(9): 1095–1101. [Hu Z M, Fan J W, Zhong H P. 2005. Progress on grassland underground biomass researches in China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 24(9): 1095–1101.]
- 黄德华, 陈佐忠, 张鸿芳. 1988. 贝加尔针茅、克氏针茅、线叶菊草原地下生物量的比较研究 [M]// 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究 (第 2 集). 北京: 科学出版社, 122–131. [Huang D H, Chen Z Z, Zhang H F. 1988. Comparison of underground biomass among *Stipa baicalensis*, *Stipa krylovii*, *Filifolium sibiricum* steppe [M]// Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences. Research on grassland ecosystem (2nd series). Beijing: Science Press, 122–131.]
- 金峰, 杨浩, 赵其国. 2000. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展 [J]. *土壤*, (1): 11–18. [Jin F, Yang H, Zhao Q G. 2000. Advances of soil organic carbon storage and its influencing factors [J]. *Soils*, (1): 11–18.]
- 马文红, 杨元合, 贺金生, 等. 2008. 内蒙古温带草地生物量及其与环境因子的关系 [J]. *中国科学 C 辑: 生命科学*, 38(1): 84–92. [Ma W H, Yang Y Y, He J S, et al. 2008. Inner Mongolia temperate grassland biomass and its relationships with environmental factors [J]. *Science in China (Series C: Life Sciences)*, 38(1): 84–92.]
- 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 2013. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化 [J]. *应用生态学报*, 24(1): 183–189. [Pan T, Wu S H, Dai E F, et al. 2013. Spatiotemporal variation of water source supply service in Three Rivers Source Area of China based on InVEST model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24(1): 183–189.]
- 石锋, 李玉娥, 高清竹, 等. 2009. 管理措施对我国草地土壤有机碳的影响 [J]. *草业科学*, 26(3): 9–15. [Shi F, Li Y E, Gao Q Z, et al. 2009. Effects of managements on soil organic carbon of grassland in China [J]. *Pratacultural Science*, 26(3): 9–15.]
- 孙刚, 房岩, 韩国军, 等. 2009. 稻-鱼复合生态系统对水田土壤理化性状的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 4: 21–24. [Sun G, Fang Y, Han G J, et al. 2009. Effects of rice-fish integrated ecosystem on physical and chemical properties of paddy soil [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 4: 21–24.]
- 王国杰, 汪诗平, 郝彦宾, 等. 2005. 水分梯度上放牧对内蒙古主要草原群落功能群多样性与生产力关系的影响 [J]. *生态学报*, 25(7): 1649–1656. [Wang G J, Wang S P, Hao Y B, et al. 2005. Effect of grazing on the plant functional group diversity and community biomass and their relationship along a precipitation gradient in Inner Mongolia steppe [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 25(7): 1649–1656.]
- 王艳芬, 汪诗平. 1999. 不同放牧率对内蒙古典型草原地下生物量的影响 [J]. *草地学报*, 7(3): 198–203. [Wang Y F, Wang S P. 1999. Influence of different stocking rates on belowground biomass in Inner Mongolia steppe [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 7(3): 198–203.]
- 王颖, 张科利, 李峰. 2012. 基于 10 年 MODIS 数据的锡林郭勒盟草原植被覆盖度变化监测 [J]. *干旱区资源与环境*, 26(9): 165–169. [Wang Y, Zhang K L, Li F. 2012. Monitoring of vegetation cover change in Xilingol League based on MODIS data over 10 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 26(9): 165–169.]
- 吴哲, 陈歆, 刘贝贝, 等. 2013. InVEST 模型及其应用的研究进展 [J]. *热带农业科学*, 33(4): 58–61. [Wu Z, Chen X, Liu B B, et al. 2013. Research progress and application of InVEST model [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 33(4): 58–61.]
- 吴征镒. 1980. 中国植被 [M]. 北京: 科学出版社. [Wu Z Y. 1980. Chinese vegetation [M]. Beijing: Science Press.]
- 锡林图雅, 徐柱, 郑阳. 2009. 不同放牧率对内蒙古克氏针茅草原地下生物量及地上净初级生产量的影响 [J]. *中国草地学报*, 31(3): 26–29. [Xilintuya, Xu Z, Zheng Y. 2009. Influence of different stocking rates on underground biomass and net primary productivity on *Stipakrylovii* steppe in Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 31(3): 26–29.]
- 徐霞, 张智才, 张勇, 等. 2010. 不同土地利用方式下的生物量季节动态研究 [J]. *安徽农业科学*, 38(35): 20277–20279. [Xu X, Zhang Z C, Zhang Y, et al. 2010. Seasonal dynamics of biomass under different land use patterns [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 38(35): 20277–20279.]
- 杨福围. 1988. 矮嵩草甸生物量季节动态与年际间动态 [C]// 高寒草甸生态系统国际学术会议. 北京: 科学出版社, 61–71. [Yang F T. 1988. Biomass of *Kobresia huilis* meadow between seasonal dynamics and interannual dynamics [C]//

- International Conference of Alpine meadow ecosystem. Beijing: Science Press, 61–71.]
- 杨婷婷, 高永, 吴新宏, 等. 2013. 小针茅草原植被地下与地上生物量季节动态及根冠比变化规律 [J]. *干旱区研究*, 30(1): 109–114. [Yang T T, Gao Y, Wu X H, et al. 2013. Study on seasonal variation of aboveground and underground biomasses of vegetation in the *Stipa klemenzii* steppe and their ratio [J]. *Arid Zone Research*, 30(1): 109–114.]
- 杨园园, 戴尔阜, 付华. 2012. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能价值评估研究框架 [J]. *首都师范大学学报 (自然科学版)*, 33(3): 41–47. [Yang Y Y, Dai E F, Fu H. 2012. The assessment framework of ecosystem service value based on InVEST model [J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 33(3): 41–47.]
- 张圣微, 赵鸿彬, 张发, 等. 2008. 基于 MODIS NDVI 的锡林郭勒草原近 10 年的时空动态 [J]. *草业科学*, 31(8): 1416–1423. [Zhang S W, Zhao H B, Zhang F, et al. 2008. Temporal and spatial dynamic of Xilingol steppe based on MODIS NDVI in recent ten years [J]. *Pratacultural Science*, 31(8): 1416–1423.]
- 张斯屿, 白晓永, 王世杰, 等. 2014. 基于 InVEST 模型的典型石漠化地区生态系统服务评估——以晴隆县为例 [J]. *地球环境学报*, 5(5): 328–338. [Zhang S Y, Bai X Y, Wang S J, et al. 2014. Ecosystem services evaluation of typical rocky desertification areas based on InVEST model—A case study at Qinglong Country, Guizhou Province [J]. *Journal of Earth Environment*, 5(5): 328–338.]
- Bai Y F, Han X G, Wu J G, et al. 2004. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland [J]. *Nature*, 431(3): 181–184.
- Davidson E A, Janssens I A. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. *Nature*, 440(2): 165–173.
- Dolan K A. 2010. Names you need to know in 2011: Natural Capital Project [EB/OL]. 2010-11-01. <http://www.forbes.com/sites/kerryadolan/2010/10/29/name-you-need-to-know-natural-capital-project>.
- Fan J W, Zhong H P, Harris W, et al. 2008. Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above and below ground biomass [J]. *Climatic Change*, 86(14): 375–396.
- Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. 2007. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981–2000 [J]. *Science in China Series D*, 50(7): 1341–1350.
- Fang J Y, Piao S, Field C B, et al. 2003. Increasing net primary production in China from 1982 to 1999 [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(1): 293–297.
- Feng X J, Simpson A J, Wislon K P, et al. 2008. Increased cuticular carbon sequestration and lignin oxidation in response to soil warming [J]. *Nature Geoscience*, 23(5): 836–839.
- Fisher M J, Rao I M, Lascano C E, et al. 1995. Pasture soils as carbon sink [J]. *Nature*, 376(32): 472–473.
- Lal R. 1999. World soils and the greenhouse effect [J]. *Global Change News Letter*, 37(9): 4–5.
- Ma W H, Liu Z L, Wang Z H, et al. 2010. Climate change alters interannual variation of grassland aboveground productivity: evidence from a 22-year measurement series in the Inner Mongolian grassland [J]. *Plant Research*, 8(1): 1–10.
- Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. 2005. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomass [J]. *Global Change Biology*, 11(21): 1–13.
- Olsen J S, Watts J A, Allison L J. 1983. Carbon in live vegetation of major world ecosystems [M]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 50–51.
- Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. 2007. Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, GB2002, doi:10.1029/2005GB002634.
- Scharpenseel H W, Becker-Heidmann P, Neue H U. 1989. Bomb-carbon,  $^{14}\text{C}$ -dating and  $^{13}\text{C}$ —Measurements as tracers of organic matter dynamics as well as of morphogenetic and turbation processes [J]. *Science of the Total Environment*, 81/82: 99–110.
- Schenk H J, Jackson R B. 2002. The global biogeography of roots [J]. *Ecological Monographs*, 72(3): 311–328.
- Scurlock J M, Hall D O. 1998. The global carbon sink: a grass land perspective [J]. *Global Change Biology*, 4(2): 229–233.
- Scurlock J M, Olson R J. 2002. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements [J]. *Global Change Biology*, 8(6): 736–753.
- Turner R K, Paavola J, Cooper P, et al. 2003. Valuing nature: lessons learned and future research Directions [J]. *Ecological Economics*, 46(3): 493–510.
- Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, et al. 2010. Soil carbon stock and its changes in northern China's grasslands from 1980s to 2000s [J]. *Global Change Biology*, 16(11): 3036–3047.
- Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H, et al. 2008. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands [J]. *Global Change Biology*, 14(2): 1592–1599.
- Zhou Z, Sun O, Huang J, et al. 2007. Soil carbon and nitrogen stores and storage potential as affected by landuse in an agro-pastoral ecotone of northern China [J]. *Biogeochemistry*, 82(1): 127–138.