

郭灵辉,高江波,吴绍洪,等. 1981—2010年内蒙古草地土壤有机碳时空变化及其气候敏感性[J]. 环境科学研究, 2016, 29(7): 1050–1058.  
GUO Linghui, GAO Jiangbo, WU Shaohong *et al.* Spatial-temporal change of soil organic carbon and its susceptibility to climate change in Inner Mongolia Grassland during 1981–2010 [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(7): 1050–1058.

# 1981—2010年内蒙古草地土壤有机碳时空变化及其气候敏感性

郭灵辉<sup>1</sup>, 高江波<sup>2,3\*</sup>, 吴绍洪<sup>2,3</sup>, 郝成元<sup>1</sup>, 赵东升<sup>2,3</sup>

1. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000
2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101
3. 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

**摘要:** 草地土壤有机碳储量巨大, 其较小幅度的波动即可能显著反馈于气候变化. 基于1981—2010年内蒙古自治区境内及其周边共计92个气象台站气候要素插值数据, 采用空间化的生物地球化学模型——CENTURY 4.5 模拟分析近30年来内蒙古草地表层(0~20 cm)土壤有机碳的空间格局与动态变化特征, 并通过构建气候变化情景探讨其对主要气候要素的敏感性. 结果表明: 近30年内蒙古草地表层土壤有机碳密度平均值约为1.99 kg/m<sup>2</sup>(以C计), 在空间上呈由东北向西南逐渐减少的分布特征. 近30年来内蒙古草地表层土壤有机碳密度略有增加, 年均增幅约0.22%, 其中草甸草原的增速(14.25 g/(m<sup>2</sup>·a))最大, 荒漠草原的增速(1.36 g/(m<sup>2</sup>·a))最小. 草地表层土壤有机碳密度年际变化差异明显, 1980s至1990s的增加较为缓慢, 1990s至2000s的增幅约为前者的2倍, 其中草甸草原和典型草原土壤有机碳增幅较大. 气候敏感性分析结果显示, 区域降水量变化可能是近30年内蒙古草地表层土壤有机碳密度变化的主要影响因素, 但不同草地类型表层土壤有机碳密度对气候变化的敏感性存在较大差异; 典型草原与草甸草原表层土壤有机碳变化主要受控于降水量变化, 荒漠草原则主要受控于温度变化.

**关键词:** 气候变化; 内蒙古草地; CENTURY 4.5; 土壤有机碳; 敏感性

中图分类号: X142

文章编号: 1001-6929(2016)07-1050-09

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2016.07.13

## Spatial-Temporal Change of Soil Organic Carbon and Its Susceptibility to Climate Change in Inner Mongolia Grassland during 1981–2010

GUO Linghui<sup>1</sup>, GAO Jiangbo<sup>2,3\*</sup>, WU Shaohong<sup>2,3</sup>, HAO Chengyuan<sup>1</sup>, ZHAO Dongsheng<sup>2,3</sup>

1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China
2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
3. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract:** Grassland soil is a large organic carbon reservoir, and a slight change in soil organic carbon (SOC) stocks has a considerable effect on atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, which contributes to climate warming. A comprehensive assessment on SOC dynamics and their susceptibility to climate change in Inner Mongolia grassland is still lacking. Based on the climatic interpolation data from 92 meteorological stations over Inner Mongolia and surrounding areas, the spatial distribution of topsoil (0–20 cm) organic carbon storage in Inner Mongolia grassland and its dynamics during 1981–2010 were estimated using the CENTURY-based modeling system (complying CENTURY model from a site-based model into a spatial model). The sensitivity to climate change was also examined based on scenario simulation analysis.

收稿日期: 2015-12-14

修订日期: 2016-04-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAC19B04, 2012BAC19B10);  
国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB403206)

作者简介: 郭灵辉(1983-)男, 河南洛阳人, 讲师, 博士, 主要从事气候变化与生态效应研究, guolinghui@hpu.edu.cn.

\* 责任作者: 高江波(1984-)男, 山东临沂人, 副研究员, 博士, 主要从事地气相互作用、土地利用地表过程-资源环境效应研究, gaojiangbo@igsrr.ac.cn

The results showed that the spatial distribution of SOC density (SOC<sub>D</sub>) in Inner Mongolia grassland showed a decreasing trend from the northeast to the southwest, with an average density of 1.99 kg/m<sup>2</sup>. Inner Mongolia grassland SOC<sub>D</sub> significantly increased over the past three decades, with an annual increase of 0.22%, while SOC<sub>D</sub> also showed a marked heterogeneity corresponding to grassland types, with the largest increase rate of 14.25 g/(m<sup>2</sup>·a) in meadow steppe and the least rate (1.36

$g/(m^2 \cdot a)$  in desert steppe. There was also a large decadal variability in SOCD. From the 1980s to the 1990s, it changed very slowly, while it was shown to change greatly from the 1990s to the 2000s, about twice as much as the former, primarily attributed to changes in meadow steppe and typical steppe. At the regional scale, change in precipitation played a critical role in the increase of SOCD, but its relative role was not constant across the study area. Increase in SOCD over the typical steppe and meadow steppe was primarily attributed to precipitation changes, while rising temperature was the main cause of SOCD increase in desert steppe.

**Keywords:** climate change; Inner Mongolia grassland; CENTURY 4.5; soil organic carbon; susceptibility

草地是地球上分布最广的陆地生态系统类型之一,约占全球陆地总面积的 20%<sup>[1]</sup>. 其土壤碳储存能力巨大<sup>[2-4]</sup>,至少占据了 10% 的全球土壤碳储量<sup>[5]</sup>,甚至可能高达 30%<sup>[6]</sup>. 以变暖为主要特征的全球气候变化必将导致土壤有机碳蓄积量及动态平衡的变化,而草地土壤碳库微小幅度的变化即可能显著影响大气 CO<sub>2</sub> 浓度的变化,进而反馈于全球气候<sup>[7-9]</sup>. 因此,草地土壤碳库变化及其演变机制已成为全球气候变化和陆地生态系统碳循环研究的热点<sup>[10-12]</sup>. 内蒙古草地位于我国北部,总面积约为  $8.667 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是我国北方温带草原的主体,其土壤碳库大小及动态变化对区域碳收支具有重要意义<sup>[13-15]</sup>. 该区地处东亚季风区北缘,气候变率大,近 50 年来增温速率远超我国大陆平均增温水平,是我国气候变化敏感区域之一<sup>[16-17]</sup>,这使得气候变化下该区草地土壤有机碳的源汇效应问题成为学者和决策者共同关注的议题.

迄今许多学者从不同角度对内蒙古草地土壤碳循环做了大量研究,如典型群落土壤有机碳碳素循环<sup>[18-19]</sup>、流域土壤有机碳空间变异<sup>[20]</sup>、区域土壤有机碳对比<sup>[21-22]</sup>等基于样点的局地分析,以及基于全国第二次土壤普查资料的内蒙古土壤有机碳空间格局的静态研究等<sup>[23-24]</sup>. 这些研究在内蒙古草地土壤碳循环微观机理和区域格局方面取得颇多成果,但从整体上揭示内蒙古草地土壤碳库动态变化的研究尚显薄弱<sup>[25]</sup>. 由于土壤有机碳空间变异性大,传统方法难以准确估算区域尺度的特征,模型模拟已成为气候变化背景下区域土壤有机碳研究的重要手段<sup>[26]</sup>,如 XIAO 等<sup>[27]</sup>以草地类型为单元,模拟分析了气候变化对内蒙古草地土壤有机碳的影响;WAN 等<sup>[28-29]</sup>预估了气候变化情景下内蒙古草地土壤有机碳的可能变化趋势,但对其主要驱动因素及作用程度鲜有涉及.

CENTURY 模型是源于草地生态系统碳、氮等元素循环而建立起来的生物地球化学模型,是当前应用较广且较为成熟的草地土壤有机碳动态模型之一. 因此,该研究以对气候变化最为敏感的草地表层 (0~20 cm) 土壤有机碳 (SOC) 为研究对象,利用空

间化后的 CENTURY 模型,模拟分析内蒙古草地表层土壤有机碳的时空变化及所受气候因子的驱动作用,以期估算草地土壤碳截存能力、制订应对气候变化决策提供参考.

## 1 数据与方法

### 1.1 CENTURY 模型及空间化

CENTURY 模型是基于多年试验数据开发出来的草地生态系统生物地球化学模型<sup>[30-31]</sup>. 该模型着眼于气候变化及人类干扰对草地生态系统的动态影响,是目前草地土壤有机碳循环及其对环境变化响应研究中最有效的模拟工具之一<sup>[1,32-33]</sup>. 然而,CENTURY 4.5 是基于点尺度,每次运行都需要用户手动输入参数并通过 DOC 命令行进行设置和进程控制,这显然难以满足区域尺度的研究需求. 为此,该研究通过编译程序实现其空间化,具体过程如图 1 所示:①构建模型所需的气候、土壤、地理位置以及草地类型栅格数据集;②根据同一草地类型具有较为相似的生物学特征,构建以草地类型为单元的植被生理参数体系;③在点尺度上反复调试参数与模型验证,优化参数;④逐点调用 CENTURY 4.5 模型主程序进行模拟,并进行空间模拟结果验证.

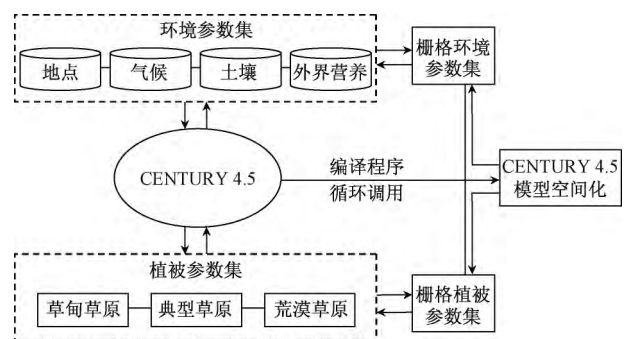


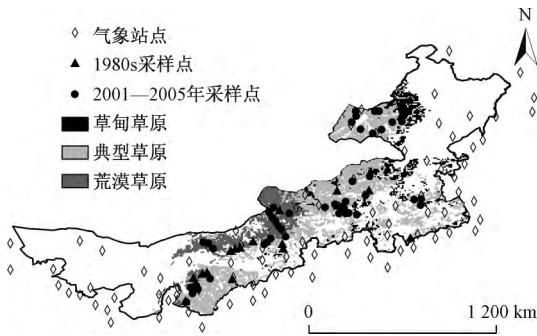
图 1 CENTURY 4.5 模型空间化过程

Fig. 1 The process of complying CENTURY 4.5 model from a site-based model into spatial model

### 1.2 数据源及预处理

草地类型数据源于中国科学院《中国植被图集 1:1 000 000》(<http://westdc.westgis.ac.cn>),并参照《中国草地资源》<sup>[34]</sup>中草地系统分类标准进行分类,

通过 ArcGIS 10.0 平台重采样为 8 km 空间分辨率的栅格数据,该研究重点关注内蒙古自治区草甸草原、典型草原、荒漠草原等主要草地类型(见图 2)。气象数据是基于 1961—2010 年内蒙古自治区境内及其周边共计 92 个气象台站(见图 2)逐月的平均温度、最高温度、最低温度以及降水量等资料(<http://www.escience.gov.cn/metdata/page/index.html>),然后使用 ANUSPLIN 4.3 软件空间插值得到<sup>[35]</sup>;植物生理参数中最适温度为最热月多年平均温度<sup>[36]</sup>,最高适宜温度比最适温度高 15 °C,而对于无法获得的数据,采用 CENTURY 4.5 模型所提供的温带混合草原的默认值;土壤质地、容重以及 pH 等数据源于联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)构建的土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD)经重采样生成 8 km 空间分辨率的栅格数据。大气 CO<sub>2</sub> 浓度数据来自美国夏威夷 Mauna Loa 的观测资料数据(<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends>)等,具体输入参数见文献[37]。内蒙古草地土壤有机碳验证数据选自文献公开样点数据<sup>[38]</sup>,71 个采样点分布如图 2 所示。



注:内蒙古自治区底图源自国家测绘地理信息局中华人民共和国 1:400 万政区版(<http://219.238.166.215/mcp/index.asp>)。审图号:GS(2008)1361 号。下同。

图 2 内蒙古自治区境内及其周边气象站点及采样点分布

Fig. 2 Distribution of the meteorological stations and the sampling sites in Inner Mongolia and its neighbouring areas

### 1.3 模拟情景设置

首先,以 1961—2010 年气候要素插值数据的多年平均值来驱动 CENTURY 4.5 模型,使其运行 5 000 年达到平衡状态;然后,根据 1961—2010 年逐月气候插值数据和 CO<sub>2</sub> 浓度数据重新驱动模型,模拟分析近 30 年来气候变化下内蒙古草地表层土壤有机碳含量(以 C 计)的演变特征,其中 1961—1980 年的模拟

结果仅为 1981—2010 年模拟提供一个较为真实的初始土壤养分、水分参数(记作 S0 情景)。

为进一步辨析草地表层土壤有机碳对关键气候因子(温度和降水)的敏感程度,参照已有研究结果<sup>[39-40]</sup>对 1981—2010 年这一模拟时段设置另外两个模拟情景:①S1 情景,仅降水量变化,温度与 CO<sub>2</sub> 浓度保持不变;②S2 情景,仅温度变化,降水量和 CO<sub>2</sub> 浓度保持不变。并将 S1 情景、S2 情景下草地表层土壤有机碳含量变化趋势率与 S0 情景下的相应结果之比定义为表层土壤有机碳对相应气候因子(降水、温度)的敏感程度。趋势率以最小二乘法线性拟合的斜率来表示,正值表示增加趋势,正值越大表示增速越快,否则相反。

## 2 结果与分析

### 2.1 CENTURY 4.5 模型模拟效果

通过将 CENTURY 4.5 模型对土壤表层有机碳含量的模拟结果与已有实测土壤(0~30 cm)有机碳密度数据<sup>[38]</sup>进行对比分析来检验其模拟效果。首先,基于文献[38]中土壤有机碳采样时段(1980s 和 2001—2005 年)分别提取 S0 情景下相应时段内蒙古草地表层(0~20 cm)土壤有机碳密度均值的空间分布,提取与文献[38]中采样点对应的土壤表层有机碳密度均值;考虑到计算过程中所用土壤有机质碳含量系数不统一(文献[38]中为 0.58,该研究中为 0.4)的问题,采用土壤有机质碳含量系数 0.4 将文献[38]中土壤有机碳数据进行统一转化,然后进行线性回归分析(见图 3)。由图 3 可见,表层(0~20 cm)土壤有机碳密度的模拟值与观测值(0~30 cm)线性关系显著( $R^2 = 0.90$ ,  $P < 0.001$ ),二者的线性斜率为

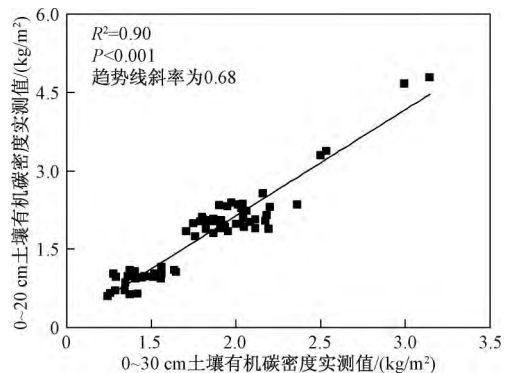


图 3 表层(0~20 cm)土壤有机碳密度模拟值与实测值(0~30 cm)的相关性

Fig. 3 The relationships between predicted (0-20 cm) and measured soil organic carbon density (0-30 cm)

0.68, 这与已有研究结果<sup>[41]</sup>较为一致。

从表层土壤有机碳密度空间分布格局上来看,近 30 年来内蒙古草地表层土壤有机碳空间分布差异较大,大体呈由东北向西南逐渐减少的分布特征(见图 4)。这与解究丽等<sup>[42]</sup>估算的表层土壤有机碳密度的空间分布基本一致,也与傅野思等<sup>[24]</sup>的研究结果十分相符。草甸草原植被生境条件相对优越,有机质分解慢使得积累较多,土壤有机碳含量较高。由草甸草原向西,生境条件越发恶劣,有机质积累量降低,土壤有机碳含量相对较低。

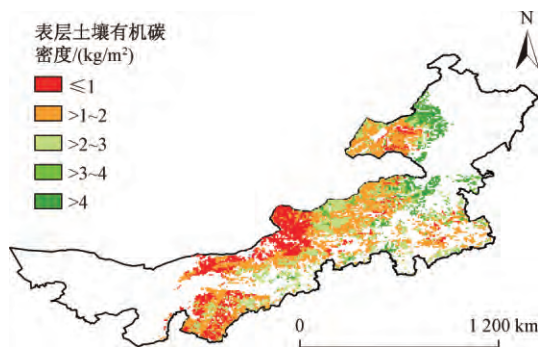


图 4 1981—2010 年内蒙古草地表层土壤有机碳密度空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution of topsoil organic carbon density in Inner Mongolia grassland during 1981-2010

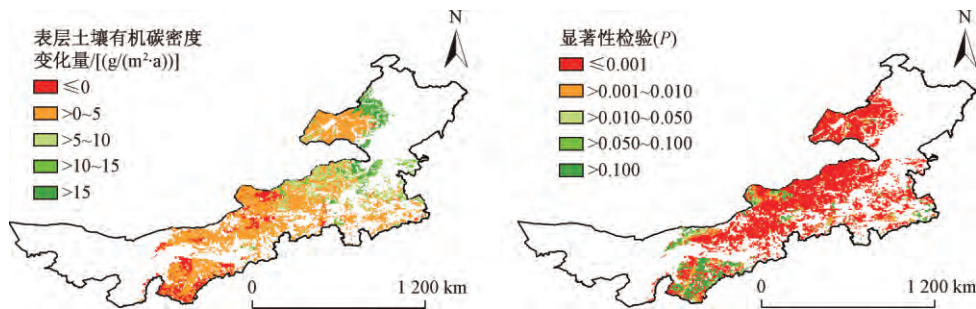


图 5 1981—2010 年内蒙古草地表层土壤有机碳密度变化趋势空间分布特征

Fig. 5 Spatial distributions of trends in topsoil organic carbon density over the Inner Mongolia grassland during 1981-2010

1980—2010 年内蒙古草地表层土壤有机碳年代际变化异质性较明显(见图 6、表 1)。其中,1980s 至 1990s 内蒙古草地表层土壤有机碳密度增加较为缓慢,增幅仅为 1.57%,而 1990s 至 2000s 的增幅约为前者的 2 倍。这主要是受草甸草原和典型草原土壤有机碳积累变化的影响,1990s 至 2000s 二者表层土壤有机碳密度分别较 1980s 至 1990s 增加了 358% 和 27%,而荒漠草原同期表层土壤有机碳密度增幅却降

## 2.2 土壤有机碳密度时空变化特征

从区域整体而言,1981—2010 年内蒙古草地表层土壤有机碳密度呈显著增加趋势(见表 1)。其中草甸草原表层土壤有机碳密度增速(14.25 g/(m<sup>2</sup>·a))最大,荒漠草原的增速(1.36 g/(m<sup>2</sup>·a))最小,草地全区的平均增速约为 4.41 g/(m<sup>2</sup>·a),相当于年均增加近 0.22%。这与戴尔阜等<sup>[25]</sup>对内蒙古草地表层土壤有机碳密度变化的研究结论比较一致。

表 1 1981—2010 年内蒙古草地表层土壤有机碳密度年代际变化趋势

Table 1 Interdecadal variations of topsoil organic carbon density and its trend in Inner Mongolia grassland during 1981-2010

草地类型	平均有机碳密度/(kg/m <sup>2</sup> )				变化速率/ [g/(m <sup>2</sup> ·a)]	R <sup>2</sup>
	1980s	1990s	2000s	1981— 2010 年		
荒漠草原	0.91	0.93	0.94	0.93	1.36**	0.54
典型草原	1.72	1.74	1.79	1.75	3.31**	0.80
草甸草原	4.31	4.43	4.60	4.45	14.25**	0.95
草地全区	1.91	1.94	2.00	1.99	4.41**	0.89

注: \* 表示 P < 0.01。

从空间分布上看,近 30 年来内蒙古草地表层土壤有机碳密度呈显著增加态势的区域占 82.03%,尤其是草地区东部的增速可达 15 g/(m<sup>2</sup>·a)。表层土壤有机碳密度降低的区域主要出现在荒漠草原南部和典型草原东南部(见图 5)。

低了近 70%(见表 1)。在空间分布上,1980s 至 1990s 大部分区域草地表层土壤有机碳密度有所增加,尤其是草甸草原与荒漠草原地区土壤有机碳密度增加区域分别占各自面积的 91.01% 和 80.66%。全区仅 22.23% 的区域表层土壤有机碳密度在降低,主要出现在典型草原地区(约占土壤有机碳密度降低区域总面积的 76.48%)。与 1980s 至 1990s 相比,1990s 至 2000s 内蒙古草地表层土壤有机碳密度增加区域

范围进一步扩大,约为全区总面积的82.24%,较前一时段的增幅约为5.74%。其中,94.68%的草甸草原与86.19%的典型草原表层土壤有机碳密度呈增加趋势,较前一时段有所扩张,但仅61.43%的荒漠草原表层土壤有机碳密度呈增加现象,较前一时段减少了约23.84%。

就增幅而言,1980s至1990s约38.33%的内蒙

古草地表层土壤有机碳密度增幅超过了同期区域整体增幅,这部分区域主要集中在草甸草原和荒漠草原的南部,约占各自面积的81.95%和67.27%。而1990s至2000s内蒙古草地表层土壤有机碳密度增幅超过同期区域平均增幅的约占区域总面积的44.28%,主要集中在在草甸草原(67.55%)和典型草原的东北部(52.22%)。

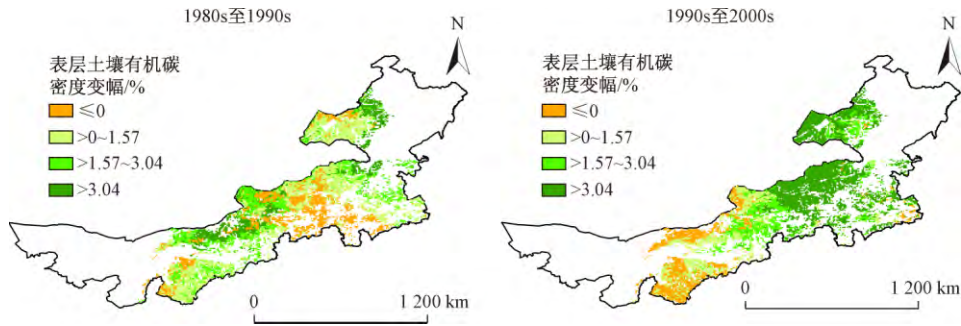


图6 1981—2010年内蒙古草地表层土壤有机碳密度年代际变化空间分布特征

Fig. 6 Variation of decadal topsoil organic carbon density in the Inner Mongolia grassland during 1981-2010

2.3 土壤有机碳对气候变化的敏感性

内蒙古草地表层土壤有机碳库对区域气候变化的敏感性特征图7所示。由图7可见,S1与S2情景下内蒙古草地表层土壤有机碳密度变化规律与S0情

景下的变化规律较为一致,其中S1情景下的增速较大,为 $5.15 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  ( $P < 0.01$ ),说明从区域整体角度来看,区域降水量变化可能是1981—2010年内蒙古草地表层土壤有机碳密度变化的主要影响因素,

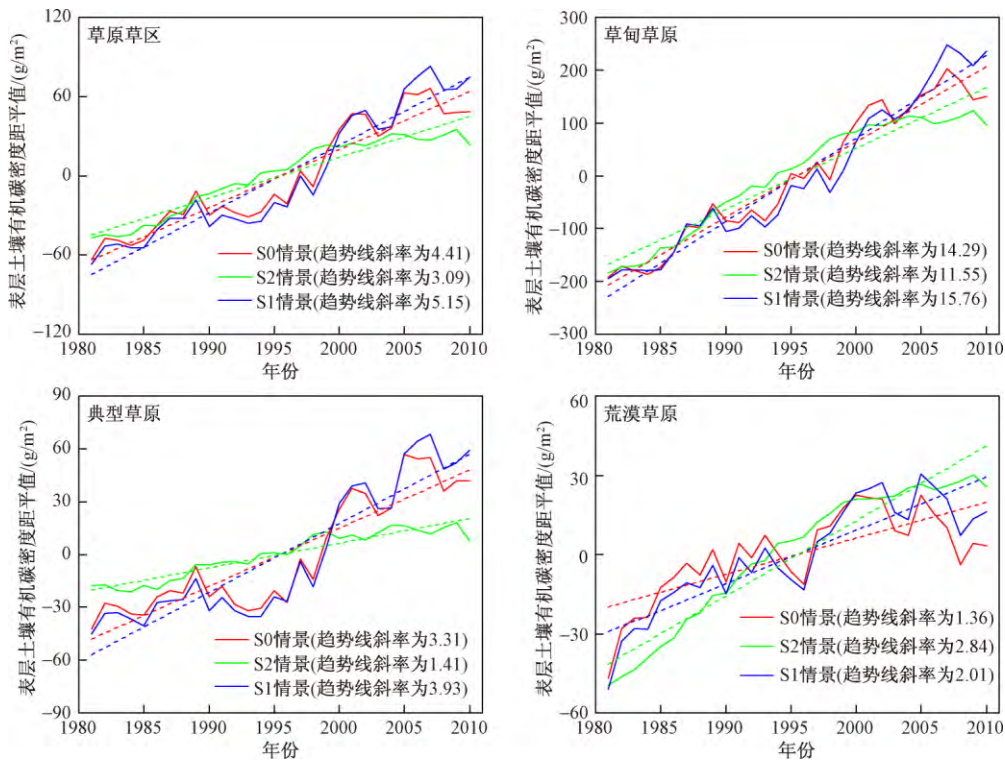


图7 不同模拟情景下1981—2010年内蒙古草地表层土壤有机碳密度变化特征

Fig. 7 Spatial distribution of trends in topsoil organic carbon density derived by different simulations over the Inner Mongolia grassland during 1981-2010

其相对作用为 117%。从草原类型上分析,降水量变化也是内蒙古典型草原与草甸草原表层土壤有机碳密度增加的主要驱动因素,其相对作用分别为 119% 和 111%;温度变化同样会导致土壤有机碳密度增加,但是其作用程度较降水量的低,尤其是典型草原。而对于荒漠草原来讲,尽管降水量变化会促使其表层土壤有机碳密度增加,但影响程度却不及温度变化。

由图 8 可见,内蒙古草地表层土壤有机碳碳库对气候变化的敏感性空间异质性较大。S2 情景下大部分区域草地表层土壤有机碳密度呈增加趋势,仅在典型草原东南部和荒漠草原南部部分区域有所下降,而

S1 情景下草地表层土壤有机碳密度变化格局与 S2 情景下较为相似,但表现为下降的区域略有扩大,并且呼伦贝尔西部与通辽南部的典型草原表层土壤有机碳密度也开始下降。尽管不同模拟情景下近 30 年来内蒙古草地表层土壤有机碳密度变化格局基本一致,但该区大部分草地表层土壤有机碳密度增加可能主要得益于降水量变化,这部分区域约占全区面积的近 60%,主要出现在草甸草原和典型草原,分别占各自面积的 76.62% 和 59.65%。温度变化同样可以影响草地表层土壤碳固定,尤其在荒漠草原,温度作为主控因子的范围是降水量的 2 倍以上。

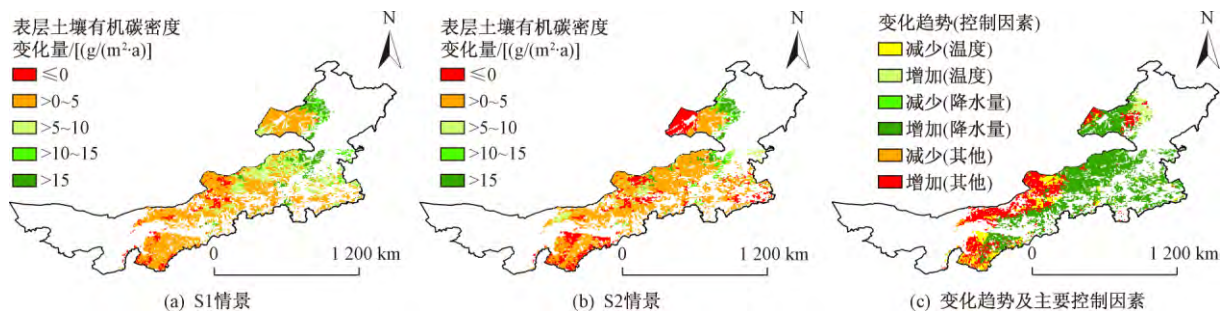


图 8 1981—2010 年不同模拟情景下内蒙古草地表层土壤有机碳密度变化及主要控制因素

Fig. 8 Spatial distributions of trends in topsoil organic carbon density under different simulation scenarios and their dominant driving factors from 1981 to 2010 in the Inner Mongolia grassland

### 3 讨论

从土壤发生学的角度来看,土壤有机碳储量空间分布的差异本身就反映了气候因子的空间差异。研究表明,土壤碳密度一般呈随降水量的增加而增加、随温度降低而增加的空间分布特征<sup>[23-43]</sup>,这与该研究土壤有机碳空间分布规律基本一致。部分研究者也由此推断,在一定范围内随着温度的升高,可能造成土壤有机碳的损失<sup>[44]</sup>,如温度升高 1 °C 时,内蒙古地区土壤有机碳损失将达到 0.91 Pg<sup>[24]</sup>。然而,该研究通过敏感性试验发现,尽管内蒙古不同类型草地表层碳库对气候变化的敏感性不同,但降水减少或者温度升高却可能微弱地促进草地表层土壤有机碳固定。这在一定程度上说明空间上气候因子与土壤有机碳储量之间相关性的研究可以辅助评价气候变化对土壤有机碳的影响,但要慎重空间分布代替时间变化的前提条件。

气候变化下草地土壤有机碳的动态变化过程主要体现在地上与地下碳素的输入与土壤呼吸引起的碳素输出。由于区域环境条件的差异,土壤有机质分解温度敏感性不同<sup>[45-46]</sup>,同时植被生产力大小、分配以及根系周转对温度和降水的响应策略也不尽相

同<sup>[47-48]</sup>,所以气候变化对土壤有机碳的影响尚无定论。一些学者认为,在气候暖干的情景下,未来 50 年草地生态系统的土壤碳库会损失 3~4 Pg<sup>[1]</sup>。也有学者<sup>[49]</sup>发现,未来气候变化下,草地土壤碳素会有所增加。土壤有机碳对气候变化的响应可能因研究时间尺度而不同,升温在短期内能增大土壤碳库,但在长期尺度上,升温会对会降低土壤碳储量<sup>[50]</sup>。土壤有机碳含量的最终变化必须通过综合判断生物残体向土壤的归还量和土壤中有机碳的分解量来确定<sup>[51]</sup>。该研究发现,近 30 年内蒙古草地表层土壤有机碳密度略有增加,并且在空间上表现出不同的气候敏感性,但具体作用机理尚需继续深入研究。

此外,该研究尚存在一定不确定性,主要表现在:①研究区内国家基准气象台站较少,尽管适当选取了周边其他气象台站予以补充,但对于东西跨度大的内蒙古自治区而言,这些气象站点显然不够,再加上插值过程的误差势必会对估算结果产生一定影响。②受资料可获得性的限制,模型空间化过程中并没有根据物种特性设置相应的植被参数(如最适温度、最高适宜温度等),而仅以草甸草原、典型草原以及荒漠草原等主要草地类型为基本单元构建了相关参数集。

③模拟过程中仅考虑了气候变化和 CO<sub>2</sub> 浓度增加的作用,并未涉及人为干扰对草地碳循环的影响.如放牧是对该区草地土壤有机碳影响最大的人类活动之一,研究认为,放牧会导致土壤有机碳含量降低,尤其是重度放牧<sup>[52-53]</sup>;也有研究指出,放牧并不总是减少土壤碳储量<sup>[54]</sup>,甚至利于土壤有机碳的积累<sup>[55]</sup>.尽管放牧与土壤有机碳之间的关系非常复杂,但至少可以肯定的是,放牧对草地土壤有机碳的影响不可忽视.在气候变化背景下,放牧对草地土壤有机碳库将会产生怎样的长期和短期影响需开展深入研究.

#### 4 结论

a) 通过空间化的 CENTURY 4.5 模型模拟得到的内蒙古草地土壤有机碳密度预测值与实测值的一致性较好,说明该方法能够较好地用于探讨表层土壤有机碳时空演变及其对气候变化的敏感性.

b) 近 30 年来内蒙古草地表层土壤有机碳密度在空间分布上呈由东北向西南减少的特征,平均有机碳密度约为 1.99 kg/m<sup>2</sup>. 草地表层土壤有机碳密度年代际变化差异明显,1980s 至 1990s 增加较为缓慢,而 1990s 至 2000s 增幅约为前者的 2 倍,30 年来年均增幅约 0.22%. 其中草甸草原的增速 (14.25 g/(m<sup>2</sup>·a)) 最大,荒漠草原的增速 (1.36 g/(m<sup>2</sup>·a)) 最小.

c) 降水量变化可能是近 30 年来内蒙古草地表层土壤有机碳密度变化的主要影响因素,但草地表层土壤有机碳密度对气候变化的敏感性空间异质性明显.

#### 参考文献(References):

- [1] PARTON W J, SCURLOCK J M O, OJIMA D S, *et al.* Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide [J]. *Global Change Biology*, 1995, 1(1): 13-22.
- [2] SCURLOCK J M O, HALL D O. The global carbon sink: a grassland perspective [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 229-233.
- [3] NI Jian. Carbon storage in grasslands of China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(2): 205-218.
- [4] FANG Jingyu, YANG Yuanhe, MA Wenhong, *et al.* Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands [J]. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(7): 757-765.
- [5] ESWARAN H, VAN DEN BERG E, REICH P. Organic carbon in soils of the world [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1): 192-194.
- [6] ANDERSON J M. The effects of climate change on decomposition processes in grassland and coniferous forests [J]. *Ecological Applications*, 1991, 1(3): 326-347.
- [7] COX P M, BETTS R A, JONES C D, *et al.* Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model [J]. *Nature*, 2000, 408(6809): 184-187.
- [8] SOUSSANA J F, LOISEAU P, VUICHARD N, *et al.* Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands [J]. *Soil Use and Management*, 2004, 20(2): 219-230.
- [9] SCHIPPER L A, BAISDEN W T, PARFITT R L, *et al.* Large losses of soil C and N from soil profiles under pasture in New Zealand during the past 20 years [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(6): 1138-1144.
- [10] FANG C, SMITH P, MONCRIEFF J B, *et al.* Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature [J]. *Nature*, 2005, 433(7021): 57-59.
- [11] OMARA F P. The role of grasslands in food security and climate change [J]. *Annals of Botany*, 2012, 110(6): 1263-1270.
- [12] DURÁN J, RODRÍGUEZ A, MORSEJ L, *et al.* Winter climate change effects on soil C and N cycles in urban grasslands [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(9): 2826-2837.
- [13] 孟淑红, 杨生, 天莹. 内蒙古草地资源及草业发展现状、问题与对策 [J]. *中国草地*, 2004, 26(5): 70-75.  
MENG Shuhong, YANG Sheng, TIAN Ying. Present situation, problems and counter measures of Inner Mongolia grassland resources and practice [J]. *Grassland of China*, 2004, 26(5): 70-75.
- [14] ZHANG Guoguang, KANG Yumei, HAN Guodong, *et al.* Effect of climate change over the past half century on the distribution, extent and NPP of ecosystems of Inner Mongolia [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 377-389.
- [15] ZHAO Dongsheng, WU Shaohong, DAI Erfu, *et al.* Effect of climate change on soil organic carbon in Inner Mongolia [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(3): 337-347.
- [16] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征 [J]. *气象学报*, 2005, 63(6): 942-956.  
REN Guoyu, GUO Jun, XU Mingzhi, *et al.* Climate changes of China's Mainland over the past half century [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 942-956.
- [17] 包云, 李晓兵, 李超, 等. 1961—2007 年内蒙古气温时空变化特征分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(12): 80-84.  
BAO Yun, LI Xiaobing, LI Chao, *et al.* Spatial-temporal distribution characteristics of temperature in Inner Mongolia during 1961-2007 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(12): 80-84.
- [18] 李凌浩, 刘先华, 陈佐忠. 内蒙古锡林河流域羊草草原生态系统碳素循环研究 [J]. *植物学报*, 1998, 40(10): 76-82.  
LI Linghao, LIU Xianhua, CHEN Zuozhong. Study on the carbon cycle of *Leymus Chinensis* steppe in the Xilin River Basin [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(10): 76-82.
- [19] 王其兵, 李凌浩, 刘先华, 等. 内蒙古锡林河流域草原土壤有机碳及氮素的空间异质性分析 [J]. *植物生态学报*, 1998, 22(5): 26-31.  
WANG Qibing, LI Linghao, LIU Xianhua, *et al.* Spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen in an Xilin River Basin grassland, Inner Mongolia [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 22(5): 26-31.

- [20] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 等. 小流域土壤有机碳密度空间变异特征的尺度效应研究[J]. 土壤, 2014, 46(5): 787-792.  
LI Long, YAO Yunfeng, QIN Fucang, *et al.* Scale-dependency of spatial variability of soil organic carbon density in small watershed [J]. Soils, 2014, 46(5): 787-792.
- [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[J]. 草业科学, 2011, 28(9): 1589-1597.  
FU Youfang, YU Yongqiang, HUANG Yao. Changes of soil organic carbon of grassland in the Xilinguole Inner Mongolia from 2000 to 2007 [J]. Pratacultural Science, 2011, 28(9): 1589-1597.
- [22] 赵哈林, 李玉强, 周瑞莲, 等. 内蒙古东部两大沙地土壤理化特性沙漠化演变规律的比较[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 779-786.  
ZHAO Halin, LI Yuqiang, ZHOU Ruilian *et al.* Comparison on soil physico chemical properties in desertification process between two sand lands in east of Inner Mongolia [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7): 779-786.
- [23] 陈庆美, 王绍强, 于贵瑞. 内蒙古自治区土壤有机碳、氮蓄积量的空间特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 699-704.  
CHEN Qingmei, WANG Shaoqiang, YU Guirui. Spatial characteristics of soil organic carbon and nitrogen in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(5): 699-704.
- [24] 傅野思, 夏学齐, 杨忠芳, 等. 内蒙古自治区土壤有机碳库储量及分布特征[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 886-895.  
FU Yesi, XIA Xueqi, YANG Zhongfang, *et al.* Storage and distribution of soil organic carbon in Inner Mongolia [J]. Geoscience, 2012, 26(5): 886-895.
- [25] 戴尔卓, 翟瑞雪, 葛全胜, 等. 1980s—2010s 内蒙古草地表层土壤有机碳储量及其变化[J]. 地理学报, 2014, 69(11): 1651-1660.  
DAI Erfu, ZHAI Ruixue, GE Quansheng, *et al.* Detecting the storage and change on topsoil organic carbon in grasslands of Inner Mongolia from 1980s to 2010s [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(11): 1651-1660.
- [26] LUGATO E, BERTI A. Potential carbon sequestration in a cultivated soil under different climate change scenarios: a modelling approach for evaluating promising management practices in north-east Italy [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 128(1): 97-103.
- [27] XIAO Xiangmin, WANG Yifeng, CHEN Zhouzhong. Dynamics of primary productivity and soil organic matter of typical steppe in the Xilin River Basin of Inner Mongolia and their response to climate change [J]. Acta Botanica Sinica, 1995, 38(1): 45-52.
- [28] WAN Yunfan, LIN Erda, XIONG Wei *et al.* Modeling the impact of climate change on soil organic carbon stock in upland soils in the 21<sup>st</sup> century in China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 141(1): 23-31.
- [29] ZHAO Dongsheng, WU Shaohong, DAI Erfu *et al.* Effect of climate change on soil organic carbon in Inner Mongolia [J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(3): 337-347.
- [30] OJIMA D S, PARTON W J, SCHIMMEL D S, *et al.* Modeling the effects of climatic and CO<sub>2</sub> changes on grassland storage of soil C [J]. Water, Air & Soil Pollution, 1993, 70(1): 643-657.
- [31] PATTON W J, SCURLOCK J, OJIMA D S *et al.* Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 785-809.
- [32] CHITI T, PAPALE D, SMITH P, *et al.* Predicting changes in soil organic carbon in Mediterranean and alpine forests during the Kyoto Protocol commitment periods using the CENTURY model [J]. Soil Use and Management, 2010, 26(4): 475-484.
- [33] LI Xiaojia, ZHANG Xianzhou, ZHANG Yangjian. Modeling the effects of climate change and elevated CO<sub>2</sub> on soil organic carbon in an alpine steppe [J]. Journal of Resources and Ecology, 2011, 2(2): 168-174.
- [34] 中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 全国畜牧兽医总站. 中国草地资源 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- [35] GUO Linghui, WU Shaohong, ZHAO Dongsheng *et al.* NDVI-based vegetation change in Inner Mongolia from 1982 to 2006 and its relationship to climate at the biome scale [J]. Advances in Meteorology, 2014, 692068.
- [36] 袁飞, 韩兴国, 葛剑平, 等. 内蒙古锡林河流域羊草草原净初级生产力及其对全球气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10): 2168-2176.  
YUAN Fei, HAN Xingguo, GE Jianpin, *et al.* Net primary productivity of *Leymus chinensis* steppe in Xilin River Basin of Inner Mongolia and its responses to global climate change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(10): 2168-2176.
- [37] 郭灵辉, 郝成元, 吴绍洪, 等. 内蒙古草地 NPP 变化特征及其对气候变化敏感性的 CENTURY 模拟研究[J]. 地理研究, 2016, 35(2): 271-284.  
GUO Linghui, HAO Chengyuan, WU Shaohong, *et al.* Analysis of changes in net primary productivity and its susceptibility to climate change of Inner Mongolian grasslands using the CENTURY model [J]. Geographical Research, 2016, 35(2): 271-284.
- [38] YANG Yuanhe, FANG Jingyun, MA Wenhong, *et al.* Soil carbon stock and its changes in northern China's grasslands from 1980s to 2000s [J]. Global Change Biology, 2010, 16(11): 3036-3047.
- [39] CRAMER W, BONDEAU A, WOODWARD F I, *et al.* Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO<sub>2</sub> and climate change: results from six dynamic global vegetation models [J]. Global Change Biology, 2001, 7(4): 357-373.
- [40] PIAO S, FRIEDLINGSTEIN P, CIAIS P *et al.* Effect of climate and CO<sub>2</sub> changes on the greening of the Northern Hemisphere over the past two decades [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(23): L23402.
- [41] 张清雨. 草地退化对土壤有机碳储量估算影响: 以内蒙古草地为例 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [42] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 35-43.  
XIE Xianli, SUN Bo, ZHOU Huizhen *et al.* Organic carbon density and storage in soil of China and spatial Analysis [J]. Acta



- Pedologica Sinica 2004 41(1):35-43.
- [43] 周涛,史培军,王绍强. 气候变化及人类活动对中国土壤有机碳储量的影响[J]. 地理学报 2003 58(5):727-734.  
ZHOU Tao, SHI Peijun, WANG Shaoqiang. Impacts of climate change and human activities on soil carbon storage in China[J]. Acta Geographica Sinica 2003 58(5):727-734.
- [44] 陈曦,刘鸿雁. 内蒙古草原区土壤碳密度(SOCD)和氮密度(TND)的影响因素分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012 48(2):317-324.  
CHEN Xi, LIU Hongyan. Factors affecting soil organic carbon density(SOCD) and total nitrogen density(TND) in Inner Mongolian steppe[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis 2012 48(2):317-324.
- [45] KIRSCHBAUM M U. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage[J]. Soil Biology and Biochemistry 1995 27(6):753-760.
- [46] DAVIDSON E A, JANSSENS I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. Nature, 2006 440(7081):165-173.
- [47] 柴曦,梁存柱,梁茂伟,等. 内蒙古草甸草原与典型草原地下生物量与生产力季节动态及其碳库潜力[J]. 生态学报 2014 34(19):5530-5540.  
CHAI Xi, LIANG Cunzhu, LIANG Maowei *et al.* Seasonal dynamics of belowground biomass and productivity and potential of carbon sequestration in meadow steppe and typical steppe, in Inner Mongolia, China[J]. Acta Ecologica Sinica 2014 34(19):5530-5540.
- [48] 黄静,曾辉,熊燕梅,等. 内蒙古温带草地低级根生物量格局及其与环境因子的关系[J]. 北京大学学报(自然科学版) 2015, 51(5):931-938.  
HUANG Jing, ZENG Hui, XIONG Yanmei *et al.* Lower-order roots biomass of temperate steppe and the environmental controls in Inner Mongolia [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis 2015 51(5):931-938.
- [49] CAO M, WOODWARD F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change[J]. Global Change Biology 1998 4(2):185-198.
- [50] 霍艳双,杨波,杨雪栋,等. 草地土壤有机碳研究进展[J]. 中国草地学报 2014 36(6):90-96.  
HUO Yanshuang, YANG Bo, YANG Xuedong *et al.* Advances in researches on grassland soil organic carbon[J]. Chinese Journal of Grassland 2014 36(6):90-96.
- [51] 肖胜生,董云社,齐玉春,等. 草地生态系统土壤有机碳库对人为干扰和全球变化的响应研究进展[J]. 地球科学进展 2009, 24(10):1138-1148.  
XIAO Shengsheng, DONG Yunshe, QI Yuchun *et al.* Advance in responses of soil organic carbon pool of grassland ecosystem to human effect and global changes[J]. Advances in Earth Science, 2009 24(10):1138-1148.
- [52] STEFFENS M, KÖLBL A, TOTSCHKE K U *et al.* Grazing effects on soil chemical and physical properties in a semiarid steppe of Inner Mongolia [J]. Geoderma 2008 143(1):63-72.
- [53] WANG Yuhui, ZHOU Gangsheng, JIA Bingrui. Modeling SOC and NPP responses of meadow steppe to different grazing intensities in Northeast China[J]. Ecological Modelling 2008 217:72-78.
- [54] SHRESTHA G, STAHL P D. Carbon accumulation and storage in semi-arid sagebrush steppe: effects of long-term grazing exclusion [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment 2008 125(1):173-181.
- [55] 闫瑞瑞,辛晓平,王旭,等. 不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应[J]. 生态学报 2014 34(6):1587-1595.  
YAN Ruirui, XIN Xiaoping, WANG Xu *et al.* The change of soil carbon and nitrogen under different grazing gradients in Hulunber meadow steppe [J]. Acta Ecologica Sinica 2014 34(6):1587-1595.

(责任编辑:周巧富)