

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.025.

张新宇, 方昭, 焦峰. 基于 DNDC 模型分析氮添加对内蒙古草甸和荒漠草地碳动态的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 84-92, 101.

Zhang Xinyu, Fang Zhao, Jiao Feng. Analysis on the Impact of Nitrogen Addition on Carbon Dynamics in Inner Mongolia Meadows and Desert Grasslands Based on the DNDC Model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 84-92, 101.

# 基于 DNDC 模型分析氮添加对内蒙古草甸和荒漠草地碳动态的影响

张新宇, 方昭, 焦峰

(西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 确定内蒙古不同草地类型在氮沉降背景下植物生物量碳和土壤有机碳的变化, 探究 DNDC 模型对该区域草地碳动态模拟的适用度, 对减缓气候变化和实现“双碳”目标具有重要意义。[方法] 通过调查内蒙古草甸和荒漠草地对氮沉降的响应, 并利用 DNDC 模型进行模拟验证。设置不同氮添加梯度 $[0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 \text{ gN}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ , 分析了氮添加对不同草地碳库的影响, 评估了 DNDC 模型对其模拟的差异。[结果] (1) 与空白对照相比, 氮添加对草甸草地和荒漠草地地上生物量碳具有促进作用, 平均分别增加了 72.68% 和 66.52%, 草甸草地在  $\text{N}_5$  处理下地下生物量碳达到最大值 (240.93  $\text{gC}/\text{kg}$ ), 荒漠草地则在  $\text{N}_4$  处理下增幅最大 (129.67  $\text{gC}/\text{kg}$ ); (2) 相对于对照组, 氮添加对两种草地地下生物量碳没有显著影响, 与地上生物量碳的响应不同, 但整体而言, 地下碳量表现为草甸草原 > 荒漠草原; (3) 氮添加对两种草地土壤有机碳含量的影响均不显著, 且不同氮添加处理间也没有显著性差异, 总体而言, 草甸草地土壤有机碳含量高于荒漠草地; (4) DNDC 模型能够较好地模拟研究区草甸草地和荒漠草地的地上、地下生物量碳和土壤有机碳, 模型的模拟值与实测值基本一致, 决定系数  $R^2$  分别为 0.9426, 0.756 8, 0.825 7, 0.523 8, 0.909 9, 0.955 2, 0.861 0, 0.732 4, 模型效率系数  $E$  分别为 0.834 5, 0.674 8, 0.799 4, 0.428 8, 0.873 1, 0.926 5, 0.716 8, 0.538 1, 点位模拟效果整体良好, 但对于生物量碳的模拟吻合程度更好, 且对荒漠草原的模拟优于草甸草地。[结论] 氮添加促进了不同干旱类型草地的固碳能力, DNDC 模型能较好反映氮沉降对内蒙古两种类型草地的影响, 因此模型可用于模拟内蒙古草地生态系统的生物量碳和土壤有机碳。

**关键词:** 内蒙古草地; 碳动态; DNDC 模型; 氮添加

中图分类号: S812

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0084-09

## Analysis on the Impact of Nitrogen Addition on Carbon Dynamics in Inner Mongolia Meadows and Desert Grasslands Based on the DNDC Model

Zhang Xinyu, Fang Zhao, Jiao Feng

(Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to determine the changes of plant biomass carbon and soil organic carbon in different grassland types in Inner Mongolia under the background of nitrogen deposition, and to investigate the applicability of the DNDC model to simulate the carbon dynamics of grasslands in this region, which is of great significance for mitigating climate change and achieving the goal of the ‘dual-carbon strategy’. [Methods] The response of Inner Mongolian meadows and desert grasslands to nitrogen deposition was investigated and verified by simulation using the DNDC model. The effects of nitrogen addition on carbon pools in different grasslands were analyzed by setting different gradients of nitrogen addition  $[0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 \text{ gN}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ , and the differences in their simulations by the DNDC model were evaluated.

收稿日期: 2023-08-19

修回日期: 2023-11-08

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土丘陵区土壤斥水性及其对降水入渗机制的影响研究”(41977426)

第一作者: 张新宇 (2000—), 女, 陕西渭南人, 在读硕士生, 主要从事水土保持研究。E-mail: 1378722238@qq.com

通信作者: 焦峰 (1967—), 男, 陕西三原人, 研究员, 博士, 主要从事水土保持效应评价研究。E-mail: Jiaof@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

[Results] (1) Compared with the control, nitrogen addition promoted aboveground biomass carbon in meadow grassland and desert grassland, with an average increase of 72.68% and 66.52%, respectively, and the belowground biomass C of meadow grassland reached the maximum under  $N_5$  treatment (240.93 gC/kg), while the increase of the desert grassland was the largest under the  $N_4$  treatment (129.67 gC/kg). (2) Compared with the control, nitrogen addition did not significantly affect belowground biomass carbon of the two grasslands, with a different response from that of above-ground biomass carbon. Nitrogen addition had no significant effect on the below-ground biomass carbon of the two types of grassland relative to the control group, and the response was different from that of the aboveground biomass carbon, but on the whole, the below-ground carbon showed the order: meadow grassland > desert grassland. (3) The effect of nitrogen addition on the soil organic carbon content of the two types of grassland was not significant, and there was no significant difference between the different treatments of nitrogen addition, and on the whole, soil organic carbon content of meadow grassland was higher than that of desert grassland, (4) The DNDC model was able to simulate the above-ground and below-ground biomass carbon and soil organic carbon of the meadow grassland and desert grassland in the study area better, and the simulated values of the model were basically consistent with the measured values, the coefficients of determination ( $R^2$ ) were 0.942 6, 0.756 8, 0.825 7, 0.523 8, and 0.909 9, respectively, 0.955 2, 0.861 0, 0.732 4, and the model efficiency coefficients  $E$  were 0.834 5, 0.674 8, 0.799 4, 0.428 8 and 0.873 1, 0.926 5, 0.716 8, 0.538 1, respectively. The simulation effect of the points was good on the whole, but for the simulation of the biomass carbon, the degree of agreement was better, and the simulation of the desert grassland was better than that of the meadow grassland. [Conclusion] Overall, nitrogen addition promotes the carbon sequestration capacity of different arid types of grasslands, and the DNDC model can better reflect the effects of nitrogen deposition on the two types of grasslands in Inner Mongolia, so the model can be used to simulate the biomass carbon and soil organic carbon of grassland ecosystems in Inner Mongolia.

**Keywords:** Inner Mongolia grassland; carbon dynamics; DNDC model; nitrogen addition

作为陆地生态系统的重要组成部分,草地生态系统承担着至关重要的生态功能<sup>[1]</sup>。据估算,草地碳库储量大约占陆地生态系统总碳库储量的 30% 以上,在维持陆地生态系统的碳平衡、调节气候等方面起着至关重要的作用<sup>[2]</sup>。在过去的几十年中,由于人类活动和大量的外源氮使用,这使得我国的大气氮沉降呈现出持续上升的态势,并已经成为全球三大氮沉积焦点之一<sup>[3]</sup>。

氮元素是对植物生长和发育至关重要的营养成分,并且在草地生态系统中,也是最重要的限制性环境因子之一<sup>[3]</sup>。在全球变化的背景之下,外源氮素的输入如大气氮沉降等会对草地生态系统的功能结构和元素循环过程产生影响。众多的科学研究已经证实,氮元素的添加通常有助于地上植物的生长<sup>[3]</sup>,通过增强植物进行光合作用的能力,可以更好地固定大气中的二氧化碳,从而有效地提升植物的生物量。同时在碳固定的过程中,大量的光合酶(含氮物质)是不可或缺的,因此当氮的供应足够时,植物对碳的固定效果会更为显著<sup>[3]</sup>。当前,复杂的地下碳循环机制使

得氮添加对地下生物量和土壤有机碳的影响变得不确定<sup>[4-6]</sup>。随着氮添加量和施氮年限的增加,虽然土壤中氮的可利用性有所增加,但这也改变了植物光合产物的分配比例<sup>[7]</sup>,从而导致植物细根生物量的减少<sup>[3]</sup>、根系分泌物生成的降低,以及根际微生物呼吸的减弱<sup>[8-9]</sup>。这些因素可能会减少地下碳的输入量,甚至有可能抵消植物地上部分碳的固定<sup>[10]</sup>。此外,氮素的过量输入,会使得土壤酸化增加或者使土壤产生过量的氨,引发氨毒害作用,影响土壤微生物呼吸以及酶活性<sup>[9]</sup>,进一步影响地下及土壤碳的输入与输出之间的动态平衡。总体而言,氮的沉降有助于提高草地生态系统中碳的固存能力<sup>[11]</sup>。然而氮沉降对于草地生态系统碳循环过程的影响仍然存在很大的不确定性,这势必会阻碍全球变化背景下草地碳源汇的评估。因此积极开展氮添加对草地生态系统碳循环的影响对于减缓气候变化和实现“双碳”目标具有十分重要的意义。

李长生等创立了 DNDC 模型,以生态系统中碳氮的迁移和转化为线索,将生态系统纳入一个可操作

的数字化模型中,用于模拟生物化学过程<sup>[12]</sup>。DNDC 模型在经历了长时间的优化和补充后,已在很多区域进行了深入研究并获得了实证。王多斌<sup>[2]</sup>、王瑞利<sup>[13]</sup>等利用 DNDC 模型对内蒙古草原和青藏高原地区的碳含量动态变化进行了模拟评估;Kang 等<sup>[14]</sup>基于在锡林草原的实测数据集对 DNDC 模型进行了检验,研究结果显示 DNDC 模型能够有效地模拟内蒙古草地生态系统中的碳积累速率和碳循环的动态变化过程。然而,目前关于 DNDC 模型的相关研究多集中于区域内的单一草地类型,而有关不同氮添加水平对不同草地碳动态影响的模拟研究相对较少,且该模型是否能够模拟不同氮添加水平对碳动态的影响,以及不同干旱类型草地的情况还尚不清楚。

因此,本研究选择内蒙古草甸和荒漠草地作为主要研究对象,通过设置不同的施氮梯度模拟大气中的氮沉降,计算并比较了内蒙古两种草地类型试验区在氮添加处理前后的碳动态变化,测定土壤有机碳、植被生物量等指标,以深入探究(1)氮添加对草甸草地和荒漠草地生物量碳和土壤有机碳的具体影响;

表 1 研究区基本概况

Table 1 Basic overview of the study area

站点	草地类型	年均温/℃	年均降水量/mm	土壤类型	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	pH
鄂温克	草甸草地	-0.85	362.67	石灰性黑钙土	1.21	6.85
杭锦旗	荒漠草地	7.09	284.41	棕钙土	1.50	8.18

## 1.2 试验设计

2016 年 11 月,在内蒙古试验区进行实地考察和站点布设,我们在草甸草地和荒漠草地分别选择一个 50 m×50 m 的平坦、匀质的地块进行围封。2017 年 5 月在围栏内采用随机区组试验设计布设试验小区,设置 7 个氮添加处理,CK(0 gN/m<sup>2</sup>·a)、N<sub>1</sub>(5 gN/m<sup>2</sup>·a)、N<sub>2</sub>(10 gN/m<sup>2</sup>·a)、N<sub>3</sub>(15 gN/m<sup>2</sup>·a)、N<sub>4</sub>(20 gN/m<sup>2</sup>·a)、N<sub>5</sub>(25 gN/m<sup>2</sup>·a)、N<sub>6</sub>(30 gN/m<sup>2</sup>·a),每个氮添加处理梯度设置 3 次重复,共有 21 个样方。样方大小为 2 m×2 m,相邻小区间有 2 m 的缓冲区。在每年 5 月中旬前后进行施肥处理,试验所用肥料为含氮 46% 的尿素(CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O)。样品采集在 2018 年 8 月中旬生长旺盛季进行。

## 1.3 材料方法

### 1.3.1 生物量测定

(1) 地上生物量。采用传统收获法,在样地内放置 0.75 m×0.75 m 的小样方调查框<sup>[15-16]</sup>,然后使用剪刀将调查框内的所有植物从基部剪下,并装入标记好的纸质袋内带回实验室。收集好的样品经高温处理(105℃,约 30 min)后,置于烘箱中加热(65℃,48 h),直至达到恒定重量后进行称量。

地上生物量(g/m<sup>2</sup>)=每个小样方干质量/(0.75×0.75)

(2) DNDC 模型是否适用于研究区域,为北方草地生态系统在氮沉降环境下准确地分析和预测碳的动态变化特性提供了科学的依据和基础资料,从而为内蒙古草地生态系统的科学管理提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区境内,基于东北—西南方向草地水热梯度变化特征选取鄂温克族自治旗(48°55′59″N,119°41′21″E)草甸草地和杭锦旗(39°46′33″N,108°39′53″E)荒漠草地作为研究对象。研究区属温带大陆性气候,年均气温分别为-0.85℃,7.09℃,多年均降水量约为 362.67 mm,284.41 mm(表 1),多集中在 6—9 月。土壤类型主要为石灰性黑钙土、棕钙土(表 1)。草甸草地常见优势种为羊草(*Leymus chinensis*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、冰草(*Agropyron cristatum*)等;荒漠草地多为短花针茅(*Stip breviflora*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、狗尾草(*Setaria viridis*)等。

(2) 地下生物量。在每个小样方内,使用内径为 7 cm 的根钻随机获取 2 个根系样品,采样深度为 30 cm<sup>[15-16]</sup>,随后用清水充分浸泡并过 1 mm 筛网进行反复冲洗,晾干后放入标记好的纸质袋中保存并带回实验室。收集好的样品经高温处理(105℃,约 30 min)后,置于烘箱中加热(65℃,48 h),直至达到恒定重量后进行称量

地下生物量(g/m<sup>2</sup>)=平均每根土芯根系干质量/πr<sup>2</sup>, r=0.035 m

1.3.2 生物量碳 收集经过烘干后的植物样品和根系样品,分别通过粉碎机彻底粉碎样品后接着进行研磨过筛处理,采用重铬酸钾外加热法以测定植物有机碳含量<sup>[17]</sup>。

1.3.3 土壤有机碳 使用土钻法对样点进行采样,取样深度为 30 cm,并将土层划分为表层(0—10 cm)和 中层(10—30 cm)。采用四分法充分混合土壤样本,接着将其装入已标记好的自封袋中,并在带回实验室后通过 1 mm 筛进行备用。对于收集到的样品,使用重铬酸钾外加热法来测定土壤中的有机碳含量<sup>[17]</sup>。

### 1.4 DNDC 模型

本研究基于 DNDC 模型的点位分析,在气象、土壤、耕作等参数输入的驱动下(表 2),对作物生长、土

壤气候和土壤地球生物化学一系列过程进行模拟。

1.4.1 模型参数的获取与输入 气象参数:主要为 2018 年日最高气温、日最低气温、温度、日降水量,数据来源于资源环境科学与数据中心 ([https:// www.resdc.cn/DataSearch.aspx](https://www.resdc.cn/DataSearch.aspx))和各个研究区内的气象站。

土壤参数:土壤容重、土壤 pH、表层土壤有机碳含量(0—10 cm)通过实地采样测量获取。而土壤质

地、黏粒含量、田间持水量和萎蔫点等数据则是依据模型默认值、《中国土壤》<sup>[18]</sup>、《中国典型草原生态系统》<sup>[19]</sup>及文献资料<sup>[20]</sup>所确定。

植被参数:最大生物量碳、生物量分配比例、生物量碳氮比值、植被需水量、植被生长积温、最适温度、固氮系数等依据实测值、文献值以及模型默认值,结合《中国草地资源》<sup>[21]</sup>确定。

表 2 DNDC 模型参数  
Table 2 DNDC model parameters

项目	输入参数	草甸草地	荒漠草地
气象	降雨中氮平均浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	2.41	2.41
	大气中 CO <sub>2</sub> 平均浓度值/(cm <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> )	319.62	319.62
	大气 CO <sub>2</sub> 增加率/(cm <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> )	1.55	1.55
	土地利用类型	湿润草地	干旱草地
土壤	土壤质地	粉砂壤土	砂壤土
	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.21	1.50
	土壤 pH	6.85	8.18
	黏粒含量(0~1)	0.14	0.12
	田间持水量(0~1)	0.50	0.45
	萎蔫点(0~1)	0.20	0.15
	饱和导水率(0~1)	0.0259	0.1248
	孔隙度(0~1)	0.543	0.435
	表层土壤有机碳含量/(gC·kg <sup>-1</sup> )(0—10 cm)	23.97	9.44
	最大生物量/(kgC·hm <sup>-2</sup> )	1110	378
	生物量分配比例(籽/叶/茎/根)	0.01/0.04/0.04/0.91	0.01/0.08/0.08/0.83
	生物量碳氮比(籽/叶/茎/根)	35/45/45/75	25/35/35/55
植被	生长积温/℃	1550	1900
	需水量/(g·g <sup>-1</sup> )	100	150
	固氮系数	1.5	1.5
	最适温度/℃	20	23

1.4.2 模型验证 为了检验 DNDC 模型模拟结果的精确性,本研究用以验证模型模拟精度的指标包括:决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)和纳什萨特克里夫模型效率系数( $E$ )。具体的计算方程式如下:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

式中: $O_i$  为第  $i$  个实测值; $P_i$  为第  $i$  个模拟值; $\bar{O}$  和  $\bar{P}$  分别表示实测值和模拟值的平均值; $n$  表示实测或模拟的次数。

1.5 数据分析

使用 R 语言对数据进行整理,使用单因素分析

对不同氮添加处理水平下生物量碳及土壤有机碳量进行分析比较,在  $LSD=0.05$  的水平下检测各指标差异显著性。使用 Origin 2021 绘图软件进行作图。

2 结果与分析

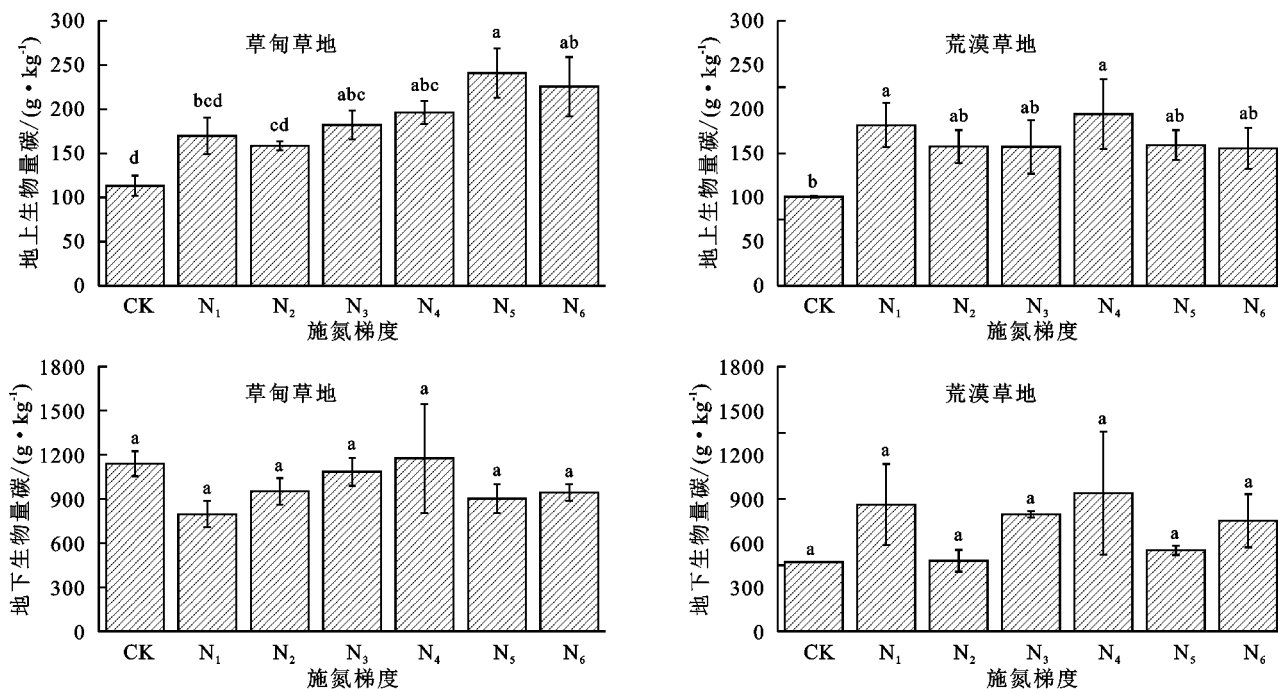
2.1 氮添加对两种草地类型地上及地下生物量碳的影响

不同氮添加处理与 CK 相比,草甸草地和荒漠草地地上生物量碳均展现出明显的促进作用(图 1)。具体而言,两种类型的草地地上生物量碳随着不同梯度氮肥的施用均呈现出“先增加后减少”的变化趋势,其最大值分别出现在  $N_5$  (240.93 gC/kg) 和  $N_4$  (129.67 gC/kg) 的处理中。在不同的施氮处理条件下,两种草地的地上生物量碳平均增加了 82.3 gC/kg,44.68 gC/kg,相应增长比例的平均值分别为 72.68%和 66.52%。这表明氮添加对草地的生物量碳含量有着显著的积极影响,尤其在一定范围内能够显著地提高地上生物量碳的积累。

相比之下,地下生物量碳对 7 种氮添加处理的响应较为微弱。随着氮的添加梯度逐渐增加,无论是草甸草地还是荒漠草地,二者的地下生物量碳均没有出现显著性变化( $p>0.05$ )。然而两种草地生物量碳对氮添加的响应趋势存在不同,如荒漠草地生物量碳在不同施氮梯度下呈显著增加的趋势,平均增加了 172.18 gC/kg,而相反地,草甸草地生物量碳在不同氮添加处理下呈现

降低的趋势,平均下降了 163.71 gC/kg。

从整体上看,草甸草地与荒漠草地地上生物量碳的平均值分别达到 183.78 gC/kg,105.46 gC/kg,而地下生物量碳的平均值分别为 998.94 gC/kg,461.68 gC/kg,值得注意的是,地下生物量碳普遍高于地上生物量碳,并且在地上、地下生物量碳的分布上,表现为草甸草地>荒漠草地。



注:不同小写字母表示同一草地类型不同氮添加下  $p<0.05$  水平下的差异显著性,下同。

图 1 氮添加对两种草地类型地上、地下生物量碳影响

Fig. 1 Effect of N addition on above-and below-ground biomass carbon in two grassland types

## 2.2 氮添加对两种草地类型土壤有机碳的影响

在两种不同类型草地 0—10 cm 和 0—30 cm 的土壤中,添加不同的氮肥处理水平并没有对有机碳产生显著的效果( $p>0.05$ ) (图 2)。土壤中的有机碳大部分主要贮存在 0—10 cm 的土壤表层中。在草甸草地和荒漠草地中,0—10 cm 的土壤有机碳占 0—30 cm 土壤有机碳的平均比例分别是 59.7%和 50.8%。在不同施氮梯度水平下,草甸草地和荒漠草地 0—10 cm 的土壤有机碳平均变化了-3.28%和 1.19%,而 0—30 cm 的土壤有机碳在不同施氮梯度下的平均变化量为-1.21,-0.092 gC/kg,这表明氮的添加对这两种草地类型的土壤碳积累没有显著影响。总体而言,土壤中的有机碳含量在两种草地类型中随着施氮梯度的变化展现出不同的趋势,但整体上无较大变化,并且草甸草地的土壤有机碳整体含量明显高于荒漠草地。

## 2.3 DNDC 模型模拟

不同施氮梯度处理下,草甸草地和荒漠草地地上、地下生物量碳模拟值与实测值呈现出基本一致的变化趋势(图 3)。模型模拟输出的生物量碳值与草

甸草地、荒漠草地的实测值之间存在很高的相关性(表 3),其中地上生物量碳  $R^2$  值分别为 0.94,0.91,地下生物量碳  $R^2$  值分别为 0.76,0.96;在两种草地类型中,地上及地下生物量碳的相对均方根误差均较大,而地下生物量碳的误差则普遍高于地上生物量碳。草甸草地的实测值与模拟值之间的偏差明显大于荒漠草地,这表明 DNDC 模型对于荒漠草地的模拟具有较好的效果;尽管两种草地地上和地下生物量碳的模型效率系数大体上接近 1 ( $E$  分别为 0.83,0.67,0.87,0.93),但从整体上看,这些模型也能够准确地描述内蒙古草地生物量碳的实际状况。

本研究对 0—10 cm 和 0—30 cm 土壤层中的有机碳含量进行了详细的测量和分析,观察到模型模拟的结果与实测值非常相近,同时在不同氮添加梯度下的响应与实际测量值也基本吻合(图 3)。通过与模拟值对比(表 3),本研究发现草甸草地和荒漠草地的  $R^2$  值分别为 0.83,0.53,0.86,0.73;除了草甸草地 0—30 cm 土壤有机碳的相对均方根误差超过 1 之外,其余的误差均小于 0.5,这表明两种草地实际测量值与

模拟值之间的偏差很小,两者之间的差异也不大。总的来说,模型的拟合效果很好,并且具有显著的一致性;两种草地类型的土壤有机碳模型效率系数总体上

接近1,这表明该模型能够很好地模拟土壤有机碳库,同时也表明DNDC模型在模拟草地生物量碳方面比模拟土壤有机碳含量的准确性更高。

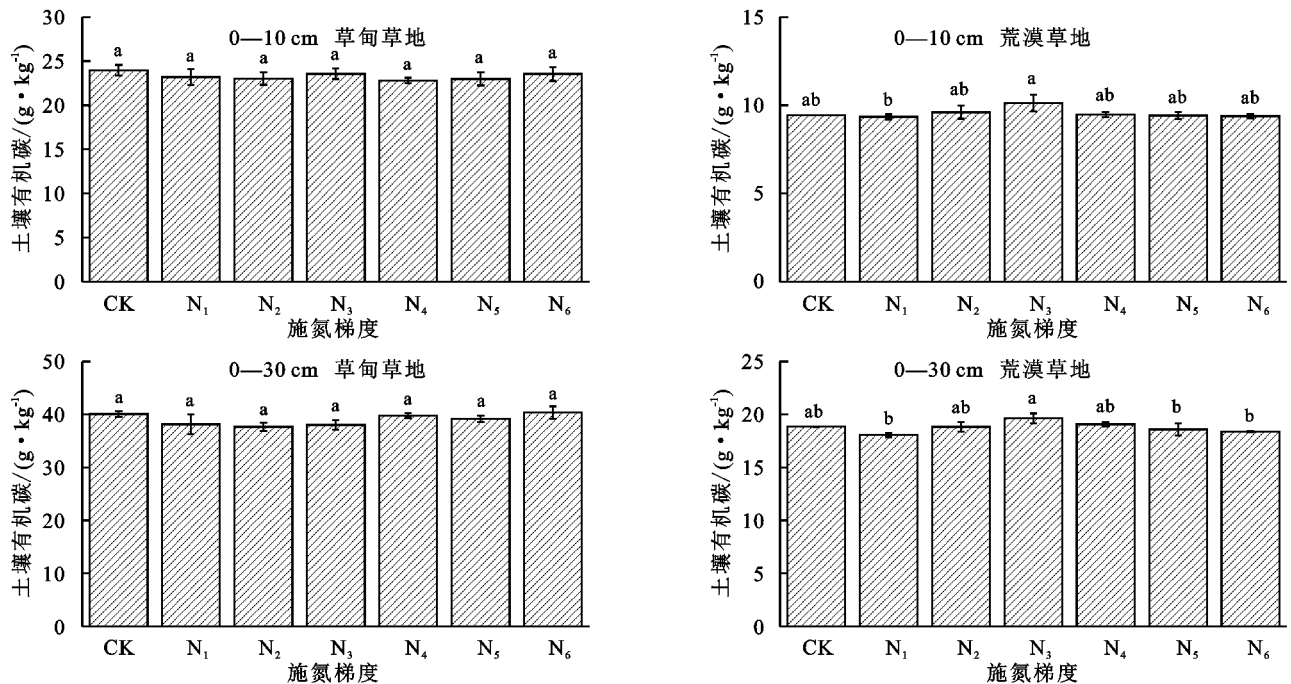


图2 氮添加对两种草地类型土壤有机碳的影响

Fig. 2 Effect of N addition on soil organic carbon in two grassland types

### 3 讨论

生物量碳作为评估生态系统固碳能力的重要指标,通常与群落多样性和生产力的变化密切相关。一般来说,植物群落多样性会随施氮量的增加而降低<sup>[22]</sup>。研究发现施氮有助于缓解草地群落氮限制,但同时也会加剧植物群落对于其他资源的依赖,如光照、磷、微量元素,导致物种之间限制资源利用的趋同,从而降低生态位维度,并加剧种间竞争,最终使得群落多样性下降<sup>[22]</sup>,进而影响生物量碳,改变碳的固存。

本文研究结果与前人一致<sup>[23-24]</sup>,氮添加缓解了两种草地对氮素需求的限制,促进草甸草地和荒漠草地上生物量碳,并且随着施氮水平增加,草甸草地上生物量碳呈现先上升后下降的变化趋势,表明草甸草地对于氮素的需求存在阈值,超过氮素需求的饱和值会对碳的固存起到抑制作用,这一结果与Tang等<sup>[25]</sup>得出的草甸草地氮饱和阈值为 $7.5 \sim 20 \text{ gN}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的结论相对应;而地下生物量碳均没有显著性变化,主要是因为施氮提高了土壤氮素的可利用性,植物能够以更少的能量消耗获得更多的氮元素,进而改变植物体内的有机物分配与运输,减少了光合产物向根系的分配和细根的生长<sup>[8]</sup>。有研究指出<sup>[26]</sup>,草地生态系统对氮添加的反应与年平均降水量呈显著

正相关,即水分越充足,植物对于氮素的响应越显著,特别是在碳的固定方面。同时两种草地类型受氮素、年均降水及年均温等生态因子的影响不同,其中水分是限制草地生产力的主要因子,其次为氮元素<sup>[7]</sup>,草甸草地相较于荒漠草地而言,降雨条件较为充沛,使外源氮添加可以更好的转化为速效态氮刺激植物生长。因此草甸草地所施加的氮肥更易发挥其效应,养分供应充足,使得草甸草地植物地上碳固存增加,同时导致光合产物向地下的分配减少,并且根系需要提供更多的能量以满足地上部分<sup>[27]</sup>,反而使得地下生物量碳有所降低,甚至会抵消地上植物碳固定的增加<sup>[28]</sup>;而荒漠草地的水热条件较差且养分供给受到限制,植物会优先将养分供给根部,从而增加其对土壤养分和水分的吸收,储存更多的能量,提高地下碳的固存<sup>[27]</sup>。因而不同施氮梯度对地上生物量碳具有显著的促进作用,且氮添加对草甸草地的促进作用大于荒漠草地;而对于地下生物量碳的影响较小,并且两种草地类型对不同施氮梯度的响应也存在差异。

在评价土壤碳储存能力时,土壤中的有机碳被视为关键的参考指标。与植被中有机碳的研究相比,土壤有机碳受到氮沉降影响的程度还存在相当大的不确定因素。本项研究发现,在不同的施氮梯度条件下,草甸草地和荒漠草地0—10 cm和0—30 cm土壤

中的有机碳含量并没有明显的变化( $p > 0.05$ )<sup>[29]</sup>, 这表明短期氮添加对土壤碳积累的影响并不显著, 这与 Lu 等<sup>[6]</sup>的研究结果是一致的。一般而言, 土壤中的碳储量是由植物碳的输入与地下碳的输出之间的动态平衡所决定的。过多的氮素会导致植物组织中氮素含量的增加, 从而影响其 C/N 比值和化学构成<sup>[27]</sup>。同时, 这也会抑制酶的活性, 可能进一步减缓凋落物的分解速度<sup>[30]</sup>。凋落物的质量下降在某种程度上有助于草地生态系统中碳的储存。土壤的呼吸过程是碳排放的关键途径之一, 而土壤碳的可用性的

变动则是影响土壤呼吸对不同施氮水平反应的主要因子之一。随着氮肥施用量的逐渐增加, 植物会逐步减少光合产物在地下根系的分布和细根的生长<sup>[8]</sup>。然而, 过量的氮肥施用会抑制多酚氧化酶的活性, 降低难以利用的土壤有机质的分解。同时, 过量的氮输入也会导致土壤 pH 值下降, 从而降低土壤微生物的活性<sup>[9]</sup>, 这对土壤微生物的生长是不利的, 最终会导致土壤有机质分解的降低。氮的添加对于草地土壤有机碳的作用, 主要是基于植物凋落物对土壤碳输入和土壤呼吸对土壤碳分解的动态平衡关系。

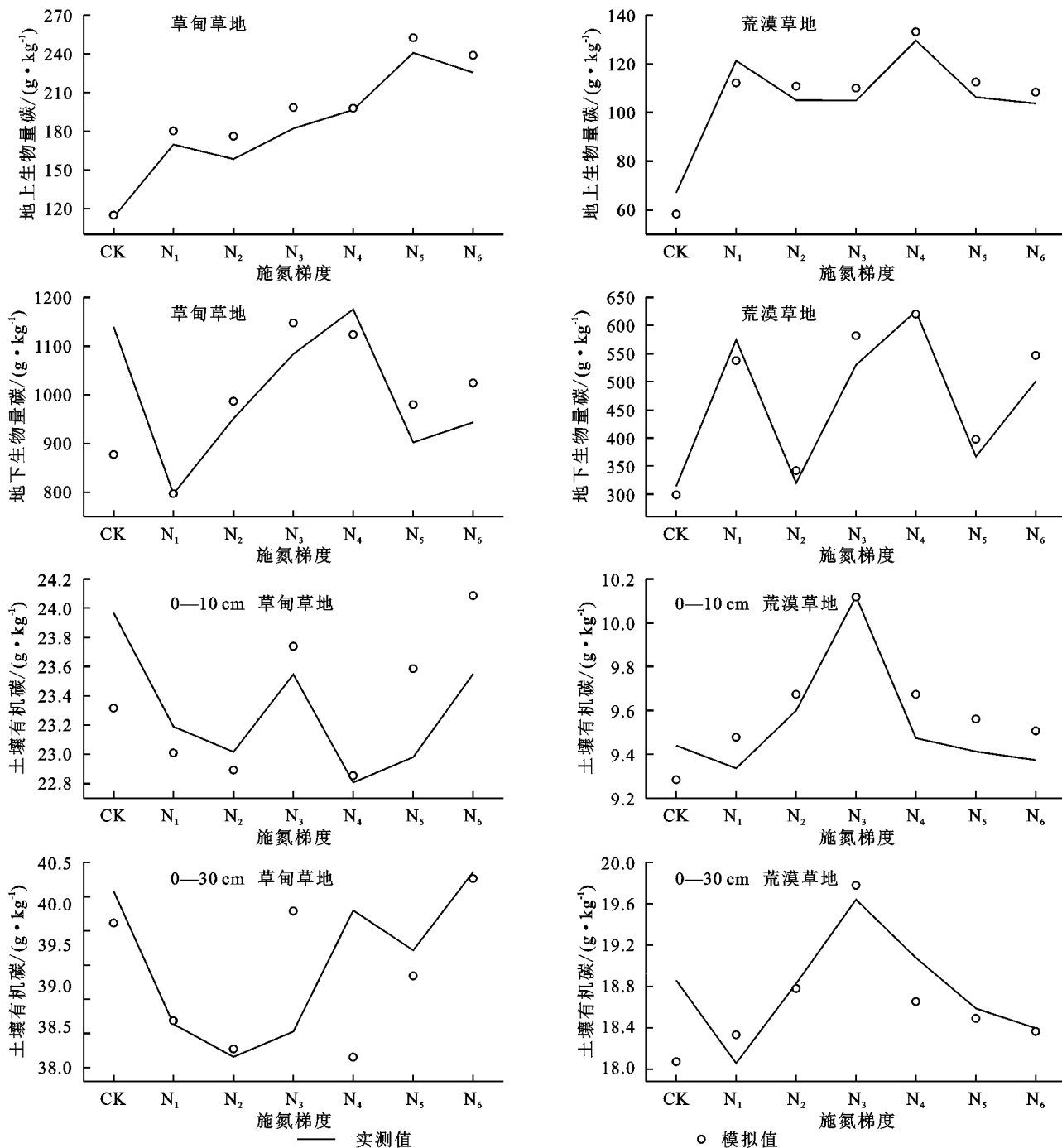


图 3 两种草地类型生物量碳和土壤有机碳的实测值与模拟值对比

Fig. 3 Comparison of measured and simulated values of biomass carbon and soil organic carbon for two grassland types

表 3 两种草地类型生物量碳与土壤有机碳的模型模拟指标

Table 3 Table of model simulation indicators of biomass carbon and soil organic carbon for two grassland types

指标	草甸草地				荒漠草地			
	地上生物量碳	地下生物量碳	0—10 cm	0—30 cm	地上生物量碳	地下生物量碳	0—10 cm	0—30 cm
			土壤有机碳	土壤有机碳			土壤有机碳	土壤有机碳
决定系数 $R^2$	0.9426	0.7568	0.8257	0.5238	0.9099	0.9552	0.8610	0.7324
均方根误差 RMSE	19.9600	149.2000	0.4649	1.3280	10.5400	61.0000	0.2330	0.4585
模型效率系数 $E$	0.8345	0.6748	0.7994	0.4288	0.8731	0.9265	0.7168	0.5381

在本研究中,DNDC 模型能够对不同施氮梯度下的两种草地生态系统碳动态进行较好的模拟,研究表明:模型对于生物量碳及土壤有机碳的模拟拟合度较高,草甸草原  $R^2$  范围为 0.52~0.94,荒漠草原  $R^2$  范围为 0.73~0.96,且模型能够反映研究区的真实情况,其中草甸草地  $E$  值范围在 0.43~0.83,荒漠草地  $E$  值范围在 0.54~0.93。而对于草甸草地与荒漠草地地上及地下生物量碳的模拟准确度较为不足,与实测值存在较大的偏差,尤其是对于地下生物量碳的模拟,但是模拟值的总体变化趋势与观测值相符合,这主要是因为地下生物量碳本身取样困难较大且样本间存在较大的空间异质性<sup>[13]</sup>。而内蒙古草地面积大,空间异质性强,土壤层内的生物化学过程复杂,导致地下生物量碳和土壤有机碳的评估结果存在较大差异。但总体而言,该模型能够准确地模拟不同施氮梯度下两种草地生态系统的真实情况,因此可以得出结论,DNDC 模型在研究区是适用的。

因此,本研究基于 DNDC 模型模拟结果的可靠性较高,未来提高模型效率的关键是更精确的数据监测以及更全面的采样指标。但目前针对氮沉降的影响多为短期内的研究,而对长期氮沉降的影响机制还需进一步探讨,同时影响生态系统碳循环的因子极其复杂,不同因子间的耦合效应影响尚不清楚,因此对氮与其他因子间的耦合还需深入了解,继续探索氮添加对生态系统碳动态的影响机制。

4 结 论

本研究结果表明短期氮添加对草甸草地和荒漠草地地上生物量碳具有促进作用,平均增加了 72.68%和 66.52%,且初步认为草甸草地可能对氮元素存在一定的饱和阈值,其氮饱和阈值为 15 gN/(m<sup>2</sup>·a)。两种草地类型的地下生物量碳对氮添加的响应存在差异,氮添加对两种草地地下生物量碳均无显著影响。相比之下,氮添加对内蒙古两种草地土壤有机碳的影响并不显著。DNDC 模型能较好地反映氮沉降对内蒙古两种草地类型碳库的影响,模型模拟结果与实测

结果的总体趋势相符,但对地下碳固存的模拟略显不足。因此未来应通过提高数据可靠性和参数精度等,使模型更加准确并逐步推广对内蒙古草地的区域模拟。此外,今后还需结合草地碳库的长期变化规律,深入分析氮沉降对草地碳库的影响机制和进一步评估模型的适用性。

参考文献(References):

[1] 梁艳,干珠扎布,张伟娜,等.气候变化对中国草原生态系统影响研究综述[J].中国农业科技导报,2014,16(2): 1-8.  
Liang Y, Ganjurjav, Zhang W N, et al. A review on effect of climate change on grassland ecosystem in China [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014,16(2):1-8.

[2] 王多斌,籍常婷,林慧龙.基于 DNDC 模型的高寒草甸土壤有机碳含量动态研究[J].草业学报,2019,28(12): 197-204.  
Wang D B, Ji C T, Lin H L. A ‘denitrification-decomposition’ (DNDC) model evaluation of alpine meadow soil carbon response to climate change[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019,28(12):197-204.

[3] 段娜,李清河,多普增,等.植物响应大气氮沉降研究进展[J].世界林业研究,2019,32(4):6-11.  
Duan N, Li Q H, Duo P Z, et al. Plant response to atmospheric nitrogen deposition: A research review[J]. World Forestry Research, 2019,32(4):6-11.

[4] Nadelhoffer K J. The potential effects of nitrogen deposition on fine-root production in forest ecosystems[J]. New Phytologist, 2000,147:131-139.

[5] Fang H J, Cheng S L, Yu G R, et al. Nitrogen deposition impacts on the amount and stability of soil organic matter in an alpine meadow ecosystem depend on the form and rate of applied nitrogen[J]. European Journal of Soil Science, 2014,65:510-519.

[6] Lu M, Zhou X H, Luo Y Q, et al. Minor stimulation of soil carbon storage by nitrogen addition: A meta-analysis [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011,140 (1-2):234-244.

- [7] 祁瑜, 黄永梅, 王艳, 等. 施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5121-5129.
- Qi Y, Huang Y M, Wang Y, et al. Biomass and its allocation of four grassland species under different nitrogen levels [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5121-5129.
- [8] Li W B, Jin C J, Guan D X, et al. The effects of simulated nitrogen deposition on plant root traits: A meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 82: 112-118.
- [9] 苏洁琼, 李新荣, 鲍婧婷. 施氮对荒漠化草原土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 664-670.
- Su J Q, Li X R, Bao J T. Effects of nitrogen addition on soil physico-chemical properties and enzyme activities in desertified steppe[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3): 664-670.
- [10] 贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 等. 外源碳氮添加对草地碳循环关键过程的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 1133-1141.
- He Y L, Qi Y C, Peng Q, et al. Effects of exogenous carbon and nitrogen addition on the key process of carbon cycle in grassland ecosystem: A review[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(3): 1133-1141.
- [11] Yue K, Peng Y, Peng C H, et al. Stimulation of terrestrial ecosystem carbon storage by nitrogen addition: A meta-analysis[J]. *Scientific Reports*, 2016, 27, 6: 19895.
- [12] 李长生. 陆地生态系统的模型模拟[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(1): 49-57.
- Li C S. Modeling terrestrial ecosystems[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(1): 49-57.
- [13] 王瑞利, 张存厚, 王明玖. 基于 DNDC 模型的赛罕乌拉自然保护区草地生态系统碳动态[J]. 中国草地学报, 2019, 41(4): 167-172.
- Wang R L, Zhang C H, Wang M J. Study on carbon dynamics of grassland ecosystem in Saihanwula nature reserve based on DNDC model[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(4): 167-172.
- [14] Kang X M, Hao Y B, Li C S, et al. Modeling impacts of climate change on carbon dynamics in a steppe ecosystem in Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11: 562-576.
- [15] 金正亮, 樊文韬, 张璞进, 等. 氮素添加对不同放牧强度下荒漠草原生产力的影响[J]. 北方农业学报, 2022, 50(6): 63-71.
- Jin Z L, Fan W T, Zhang P J, et al. Influence of nitrogen addition on the productivity of desert steppe under different grazing intensities [J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2022, 50(6): 63-71.
- [16] 郭旋, 胡中民, 李胜功, 等. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原地下生物量的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 929-939.
- Guo X, Hu Z M, Li S G, et al. Effects of nitrogen and phosphorus additions on belowground biomass of temperate typical steppe in Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(4): 929-939.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1987.
- Xiong Y, Li Q K. Soils of China[M]. 2nd Ed. Beijing: Science Press, 1987.
- [19] 陈佐忠. 中国典型草原生态系统[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- Chen Z Z. Typical grassland ecosystems in China[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [20] Wu X, Kang X M, Liu W J, et al. Using the DNDC model to simulate the potential of carbon budget in the meadow and desert steppes in Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18: 63-75.
- [21] 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.
- Ministry of agriculture of the People's Republic of China animal husbandry Division, National Animal Husbandry and Veterinary Station. Rangeland resources of China[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1996.
- [22] Zhao M, Zhang H X, Baskin C C, et al. Intra-annual species gain overrides species loss in determining species richness in a typical steppe ecosystem after a decade of nitrogen enrichment [J]. *Journal of Ecology*, 2022, 110(8): 1942-1956.
- [23] 李禄军, 曾德慧, 于占源, 等. 氮素添加对科尔沁沙质草地物种多样性和生产力的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1838-1844.
- Li L J, Zeng D H, Yu Z Y, et al. Effects of nitrogen addition on grassland species diversity and productivity in Keerqin Sandy Land [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1838-1844.
- [24] 平晓燕, 周广胜, 孙敬松. 植物光合产物分配及其影响因子研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 100-111.
- Ping X Y, Zhou G S, Sun J S. Advances in the study of photosynthate allocation and its controls [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 100-111.

- [D].北京:北京林业大学,2021.
- Wang X H. Effect of forest stand type and root architecture on hillslope stability[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.
- [24] 张红霞,彭新华,郭自春,等.土壤含水量和容重对砂姜黑土抗剪强度的影响及其传递函数构建[J].土壤通报,2022,53(3):524-531.
- Zhang H X, Peng X H, Guo Z C, et al. Influence of soil water content and bulk density on shear strength of Shajiang black soil and its pedo-transfer function construction[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(3):524-531.
- [25] 刘建平,周花玉,何天奎,等.含根量对根-土石复合体的抗剪强度影响试验初探:以垂丝海棠为例[J].岩石力学与工程学报,2023,42(S1):3618-3628.
- Liu J P, Zhou H Y, He T K, et al. Experimental study on the influence of root content on the shear strength of root-soil-rock composite: taking *Malus halliana koehne* as an example[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023,42(S1):3618-3628.
- [26] 曹玉莹,苏雪萌,周正朝,等.黄土高原典型草本植物根-土复合体抗剪性能的空间差异性及其影响因素研究[J].草业学报,2023,32(5):94-105.
- Cao Y Y, Su X M, Zhou Z C, et al. Spatial differences in, and factors influencing, the shear strength of typical herb root-soil complexes in the Loess Plateau of China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023,32(5):94-105.
- [27] 孙术发,王敬凯,赵浩然,等.大兴安岭土壤抗剪强度及影响因素研究[J].森林工程,2022,38(6):104-114.
- Sun S F, Wang J K, Zhao H R, et al. Study on soil shear strength and influencing factors in Daxing'an mountains[J]. Forest Engineering, 2022,38(6):104-114.
- [28] 杨馥铖,刘昌义,胡夏嵩,等.黄河源区不同退化程度高寒草地理化性质及复合体抗剪强度研究[J].干旱区研究,2022,39(2):560-571.
- Yang F C, Liu C Y, Hu X S, et al. Study on physical and chemical properties and shear strength characteristics of root-soil composite system with different degradation degrees of alpine grassland in the source region of the Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2022,39(2):560-571.
- [29] 祁兆鑫,余冬梅,刘亚斌,等.寒旱环境盐生植物根-土复合体抗剪强度影响因素试验研究[J].工程地质学报,2017,25(6):1438-1448.
- Qi Z X, Yu D M, Liu Y B, et al. Experimental research on factors affecting shear strength of halophyte root-soil composite systems in cold and arid environments[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(6):1438-1448.
- [30] 孙庆敏,葛永刚,陈攀,等.汶川典型植物根-土复合体抗剪强度影响因素评价[J].水土保持学报,2022,36(1):58-65.
- Sun Q M, Ge Y G, Chen P, et al. Evaluation of factors affecting the shear strength of root-soil composite of typical plants in Wenchuan county[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):58-65.

~~~~~

(上接第92页)

- [25] Tang Z S, Deng L, An H, et al. The effect of nitrogen addition on community structure and productivity in grasslands: A meta-analysis[J]. Ecological Engineering, 2017,99:31-38.
- [26] Lee M, Manning P, Rist J, et al. A global comparison of grassland biomass responses to CO<sub>2</sub> and nitrogen enrichment[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences, 2010, 365(1549):2047-2056.
- [27] 韩小雨,郭宁,李冬冬,等.氮添加对内蒙古不同草原生物量及土壤碳氮变化特征的影响[J].草业学报,2022,31(1):13-25.
- Han X Y, Guo N, Li D D, et al. Effects of nitrogen addition on soil carbon and nitrogen and biomass change in different grassland types in Inner Mongolia [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022,31(1):13-25.
- [28] Luo Q P, Gong J R, Yang L L, et al. Impacts of nitrogen addition on the carbon balance in a temperate semiarid grassland ecosystem[J]. Biology and Fertility of Soils, 2017,53:911-927.
- [29] Bai W M, Wang Z W, Chen Q S, et al. Spatial and temporal effects of nitrogen addition on root life span of *leymus chinensis* in a typical steppe of Inner Mongolia[J]. Functional Ecology, 2008,22(4):583-591.
- [30] 于雯超,宋晓龙,王慧,等.氮沉降对草原凋落物分解的影响[J].农业资源与环境学报,2013,30(6):14-19.
- Yu W C, Song X L, Wang H, et al. Advances in the effect of nitrogen deposition on grassland litter decomposition[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2013,30(6):14-19.