

DOI: 10.16742/j.zgdx.2017-05-17

模拟氮沉降和增水及其交互作用对高寒草甸 N₂O 排放的影响

杜岩功¹, 曹莹芳¹, 周 庚², 郭小伟¹

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2. 山东省威海市农业局, 山东 威海 264411)

摘要:在青藏高原海北站, 选择高寒矮嵩草草甸为研究对象, 基于密闭箱—气相色谱法, 探索高寒草甸 N₂O 排放速率对模拟氮沉降、增水及其交互作用的响应特征。结果表明: 氮沉降、氮沉降和增水交互作用可以极显著增加高寒草地土壤 N₂O 排放速率 ($P < 0.01$), 其分别增加了 145.9% 和 193.5%。降水处理同样增加草地土壤 N₂O 排放速率, 但增加幅度仅为 27.2%, 未达到显著水平。高寒草地土壤 N₂O 排放速率呈现较大的季节异质性, 最高值出现于 6 月份, 为 $197.0 \pm 8.8 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ (交互作用处理样方); 最低值出现于生长季末期对照样方, 约为 $3.1 \pm 0.23 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 。

关键词:模拟氮沉降; 增水; 高寒草甸; N₂O 排放

中图分类号: S812

文献标识码: A

文章编号: 1673-5021(2017)05-0116-05

氧化亚氮(N₂O)是引起全球变暖的重要温室气体之一, 目前大气 N₂O 浓度约为 325.1 nl/L^[1], 比工业革命前增加了 20%。它在大气中存在寿命较长(通常以百年计算), 等摩尔浓度的辐射潜势是 CO₂ 的 310 倍, 破坏大气臭氧层, 导致地表紫外线辐射增强, 对环境潜在的破坏作用更加严重, 因而受到广泛关注^[2]。

青藏高原面积约 $2.5 \times 10^6 \text{ km}^2$, 高寒草甸是其主体类型之一, 具有重要的生产与生态屏障功能^[3]。近年来, 人类活动导致大气氮沉降量明显增加, 我国境内每年氮沉降量平均值约为 $21.1 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 已成为继欧洲、北美之后的第三大氮素沉降区^[4~5]。氮沉降可能会适度缓解高寒草甸生态系统的氮素限制, 但因增加了微生物利用的氮素底物含量, 会激发土壤 N₂O 排放^[6~7]; 但也有研究表明, 氮沉降对高寒草甸 N₂O 排放无显著影响, 这可能是因为受较低的土壤有机碳含量和阳离子交换量影响, 限制了微生物的吸收和利用^[8~9]。高寒草甸为 N₂O 排放源^[10], 微生物介导的硝化和反硝化作用被认为是土壤 N₂O 产生的主要途径, 并受降水量、气温、土壤有机质和矿质态氮素含量和 pH 值等多因素的耦合影响^[10~11]。近 50 年来, 青藏高原地区冰川退缩加剧, 降水呈逐渐增加趋势^[12], 降水事件显著影响草地土壤 N₂O 发生过程, 土壤湿度和 5 cm 地温与 N₂O 排放速率间均存在显著正相关关系^[13]。本研究模拟氮沉降和增水处理并对高寒草甸土壤 N₂O 排放特征进行观测, 探讨高寒草甸土壤 N₂O 排放速率对模拟氮沉降和降水增加及两者之间交互作用的响应规律, 为积极应对气候变化提供科学依据。

1 研究内容和方法

1.1 试验设计

试验设置在青海海北高寒草地生态系统国家野外科学观测研究站(海北站), 地处祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河谷, N37°29′~37°45′、E101°12′~101°23′, 海拔 3280 m。属典型的高原大陆性气候, 年均气温和年均降水量分别为 -1.7℃ 和 560 mm, 降水主要集中于生长季, 约占年总降水量的 80%, 土壤类型为草毡寒冻锥形土。样地为冬季牧场, 自 1982 年以来均保持约 4 只羊单位/hm² 的放牧强度, 生长季(5~9 月)围栏封育, 休眠季放牧。主要植物种为矮嵩草(*Kobresia humilis*)、小嵩草(*K. pygmaea*)、羊茅(*Festuca rubra*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、雪白委陵菜(*Potentilla nivea*)、线叶龙胆(*Gentiana farreri*)、早熟禾(*Poa annua*)、麻花苣(*G. straminea*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)等, 土壤基本理化性状见表 1 (8 月测定结果)。

采用双因素交互试验设计, 参照青藏高原东部大气氮沉降量^[5] (0.87~1.38 g/m²·a)、非生长季降水量每 10 年约增加 14% 的变化趋势^[12], 分别设置

收稿日期: 2017-04-21; 修回日期: 2017-06-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“高寒草甸 N₂O 排放对放牧强度的响应及微生物学机制”(31470530); 青海省自然科学基金青年基金“不同类型高寒草甸温室气体通量特征及其机制研究”(2016-ZJ-918Q)

作者简介: 杜岩功(1981-), 男, 山东威海人, 博士, 副研究员, 研究方向为高寒草甸氮素循环及其环境效应, E-mail: ygdu@nwipb.cas.cn.

表 1 高寒草甸土壤理化性状
Table 1 The basic characteristic of alpine meadow soil

土层深度 (cm) Soil depth	土壤有机碳 (%) Soil organic carbon	铵态氮 (mg/kg) Ammonia N	硝态氮 (mg/kg) Nitrate N	容重 (g/cm ³) Bulk Density	pH 值 pH value
0~10	6.2	14.5	11.3	0.75	8.4
10~20	4.8	7.6	4.9	1.11	8.3
20~30	3.6	4.5	3.7	1.13	7.9
30~40	3.2	3.4	2.8	1.15	8.2

添加 NH₄NO₃ 2gN/m²·a、年水量增加 20% 以及交互控制试验。设置对照样方(CK),各处理分别为氮沉降(N)、增水(Pre)、氮沉降和增水交互作用(N×Pre),各 3 次重复,以消除微地形等环境异质性对结果的影响。样方面积为 1m×1m,样方间隔带宽 2m。

本试验于 2013 年生长季(6~9 月)每月测定 1 次,利用喷雾器在月初将氮肥(0.49g NH₄NO₃ 折合 0.17gN)均匀喷洒于样方内,对照样方则喷洒相同数量的水,为减少因外源添加水对草地生物地球化学循环的影响,生长季每次喷施水量不足 0.5mm。每年 10 月中旬将非生长季(7 个月剂量)氮肥一次性施入土壤。降水量参考多年平均降水量数据(560mm),分生长季(占 80%)和休眠季增加,其中生长季按照月份在各月初添加 1 次(约 134mm 降水),休眠季在 10 月份一次添加。模拟氮沉降和增水处理同期进行。

1.2 N₂O 排放速率测定及土壤理化性质分析

生长季每月测定 4 次,每次取样时间为上午 9:00~11:00。每样地采集 3 次样品,用带有三通阀的 100ml 注射器抽气,立即带回实验室分析。气体测定采用气相色谱法(HP4890D, Agilent),内装电子捕获检测器(ECD)。测定的气相色谱条件及 N₂O 排放速率的计算方法详见参考文献^[2,11]。土壤有机碳采用重铬酸钾氧化法测定,铵态氮和硝态氮采用流动分析仪测定,土壤容重采用环刀称重法,pH 值采用 pH 计分析^[7,11]。

1.3 数据分析

采用双因素交互分析,研究模拟氮沉降、增水处理及其交互作用对生长季高寒草甸 N₂O 排放速率的影响。采用线性回归方程分析土壤 5cm 地温对高寒草甸 N₂O 排放的影响(SPSS 16.0)。

2 结果与分析

2.1 氮沉降、增水及交互作用对生长季土壤 N₂O 平均排放速率的影响

高寒草甸生长季对照的土壤 N₂O 平均排放速率为 17.4±4.3μg/m²·h,氮沉降处理的平均排放速率为 42.7±7.8μg/m²·h,增水处理土壤 N₂O 平均排放速率为 22.1±6.6μg/m²·h,两者交互作用处理则为 51.0±17.3μg/m²·h。氮沉降和交互作用处理均极显著提高了高寒草地生长季土壤 N₂O 排放速率(P<0.01),其分别增加 145.9%和 193.5%。降水处理亦可以增加高寒草甸土壤 N₂O 排放速率,增加幅度为 27.2%,但未达到显著水平。

2.2 高寒草地土壤 N₂O 排放速率季节性变化及其对氮沉降和增水的响应规律

高寒草甸各处理土壤 N₂O 每日排放速率随时间均基本呈现“高一低一高一低”的脉冲式变化,具有较强的季节异质性(图 1)。交互处理、氮沉降处理的土壤 N₂O 每日排放速率均明显高于对照。最高日排放速率出现于 6 月 21 日,最高值为 197.0±8.8μg/m²·h(交互作用处理样方),显著高于对照样方(排放值 66.2±4.4μg/m²·h);最低值出现于生长季末期,即 9 月 27 日(对照样方),约为 3.1±0.23μg/m²·h,且显著低于同期氮沉降和交互样方 N₂O 排放值(P<0.05,图 1)。

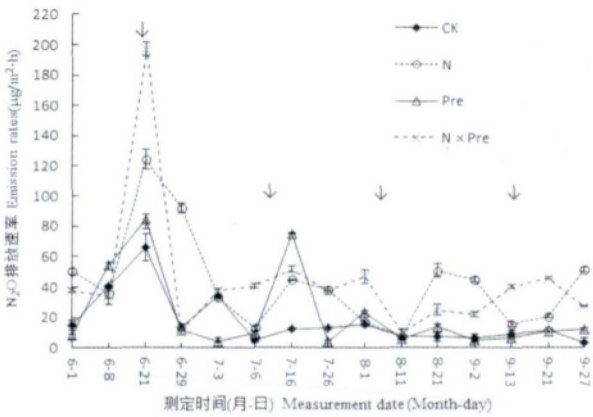


图 1 氮沉降和增水及交互处理的
高寒草甸土壤 N₂O 每日排放速率动态

Fig.1 Daily soil N₂O emission rates under nitrogen deposition and adding precipitation and its interaction in alpine meadow

2.3 土壤温度对高寒草甸土壤 N_2O 排放速率的影响

整个试验期间,对照和各处理样方的高寒草地土壤 5cm 地温与 N_2O 排放速率间均存在较弱的相关关系(图 2)。对对照样方和氮沉降处理样方土壤 N_2O 排放速率与 5cm 地温之间均为负相关关系,其他样方为正相关关系。

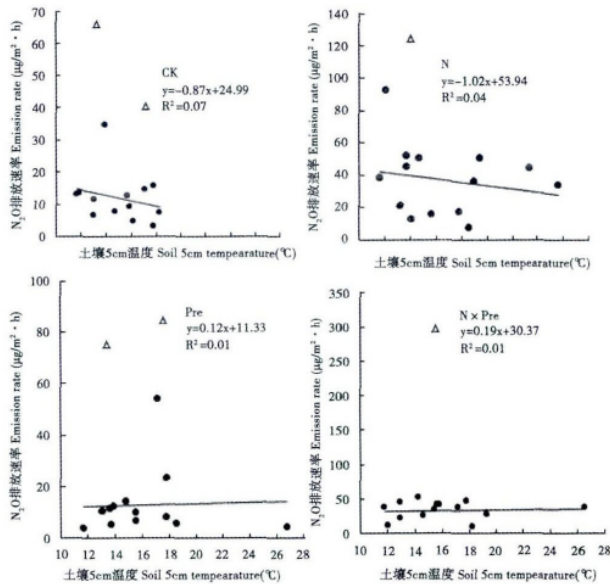


图 2 高寒草甸土壤 N_2O 排放速率
与 5cm 土壤地温间的相关关系

Fig.2 Correlation relationships between grassland N_2O emission rates and 5cm soil temperature

3 讨论

氮是蛋白质的关键组成成分,也是草地植物生长的关键限制因素^[14~15]。矿质态氮是土壤硝化和反硝化微生物的重要底物,其含量直接影响到草地土壤 N_2O 排放量^[16~17]。外源氮输入改变土壤碳氮比,影响碳氮循环过程和草地土壤 N_2O 排放特征^[18]。降水通过改变土壤肥力、地表温度和通气状况^[19]从而影响土壤 N_2O 排放速率^[20]。

高寒草甸 N_2O 排放对于氮沉降响应比较敏感,生长季短期施氮肥可以导致高寒草甸土壤 N_2O 排放微弱增加^[9],但在同样的氮沉降剂量处理下,也有研究发现矮嵩草草甸 N_2O 排放速率极其显著增加^[6],这表明高寒草甸 N_2O 排放存在较大季节异质性。随着氮输入量增多,湿地草甸沼泽土 N_2O 排放量逐渐增加^[18]。本研究发现氮沉降、氮沉降与增水交互处理均可以显著激发土壤 N_2O 排放,这也与之前研究结果一致^[6]。

高寒草甸土壤 N_2O 排放对水分条件较为敏感,尤其是反硝化过程^[2,21]。灌溉显著促进高寒草甸 N_2O 排放,从而对温室效应产生正反馈作用^[22]。高寒草甸夏季雨水比较充足,从而明显促进土壤 N_2O 释放^[21]。本研究中降水增加会激发草甸土壤 N_2O 排放。近年来,青藏高原气候明显变暖,降水逐渐增加^[22],未来氮沉降量逐渐增多、暖湿化气候情景对高寒草甸 N_2O 排放有较大的激发效应^[23],因此探索适宜的减排措施,将成为下一步重点研究内容。有研究表明,生长季高寒草甸 N_2O 排放呈现非常大的时间异质性, N_2O 排放速率的变异系数达到 518%^[9]。这与本研究结果相似,在 6 月份出现非常明显的排放峰值,这可能是因为在生长季初期,土壤具有充足氮源和土壤有机碳等硝化—反硝化微生物所需要的底物,刺激微生物活性,从而促进 N_2O 排放^[6]。

4 结论

高寒草甸为 N_2O 排放源,各处理高寒草甸 N_2O 日排放速率呈现较大季节异质性。生长季对照、氮沉降、增水、氮沉降和增水交互处理高寒草甸土壤 N_2O 平均排放速率分别为 $17.4 \pm 4.3 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 、 $42.7 \pm 7.8 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 、 $22.1 \pm 6.6 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 和 $51.0 \pm 17.3 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 。氮沉降、氮沉降和增水交互作用均显著提高了高寒草地生长季土壤 N_2O 排放速率且达到极显著水平。

参考文献 (References):

- [1] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.
Qin Dahe, Thomas Stocker. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report [J]. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climaticis*, 2014, 10(1): 1-6.
- [2] 杜岩功, 周耕, 郭小伟, 等. 青藏高原高寒草甸土壤 N_2O 排放量对温度和湿度的响应[J]. 草原与草坪, 2016, 36(1): 55-59.
Du Yangong, Zhou Geng, Guo Xiaowei, et al. Response of N_2O emission flux to soil temperature and moisture in alpine meadow on Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Grassland and Turf*, 2016, 36(1): 55-59.
- [3] Xiang X, He D, He J S, et al. Ammonia-oxidizing bacteria rather than archaea respond to short-term urea amendment in an alpine grassland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 107: 218-225.
- [4] Liu X, Zhang Y, Han W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China [J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-463.
- [5] 张金霞, 曹广民. 高寒草甸生态系统氮素循环 [J]. 生态学报, 2014, 34(1): 1-6.

- 1999, 19(4): 509-513.
- Zhang Jinxia, Cao Guangmin. The nitrogen cycle in an alpine meadow ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(4): 509-513.
- [6] Wang H, Yu L, Zhang Z, et al. Molecular mechanisms of water table lowering and nitrogen deposition in affecting greenhouse gas emissions from a Tibetan alpine wetland[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23: 815-829.
- [7] Du Y, Guo X, Cao G, et al. Increased nitrous oxide emissions resulting from nitrogen addition and increased precipitation in an alpine meadow ecosystem[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2016, 25(1): 447-451.
- [8] 梁艳, 干珠扎布, 曹旭娟, 等. 模拟氮沉降对藏北高寒草甸温室气体排放的影响[J]. *生态学报*, 2015, 37(2): 4664-4671.
- Liang Yan, Ganzhu Zhabu, Cao Xujuan, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on greenhouse gas emissions from alpine meadows in northern Tibet[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 37(2): 4664-4671.
- [9] Jiang C, Yu G, Fang H, et al. Short-term effect of increasing nitrogen deposition on CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(24): 2920-2926.
- [10] 吴建国, 周巧富. 青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量的观测[J]. *环境科学*, 2016(8): 2914-2923.
- Wu Jianguo, Zhou Qiaofu. Soil CO₂, CH₄ and N₂O fluxes from alpine meadows on the plateau of southern Qinghai province during snow cover period and growing seasons[J]. *Environmental Science*, 2016(8): 2914-2923.
- [11] 杜岩功, 曹广民, 邓永翠, 等. 金露梅灌丛草甸氧化亚氮排放特征及冻融交替的影响研究[J]. *山地学报*, 2009, 27(6): 688-697.
- Du Yangong, Cao Guangmin, Deng Yongcui, et al. Characterization and the effect of freezing-thawing on N₂O emission in an alpine *Potentilla fruticosa* shrub meadow[J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27(6): 688-697.
- [12] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.
- [13] Du Y, Cui Y, Xu X, et al. Nitrous oxide emissions from two alpine meadows in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Plant and Soil*, 2008, 311(2): 245-254.
- [14] 张仁懿, 徐当会, 杨智永, 等. 植物 N:P 化学计量特征对亚高山草甸限制类型的指示作用研究[J]. *中国草地学报*, 2014, 36(3): 79-83.
- Zhang Renyi, Xu Danghui, Yang Zhiyong, et al. The indicative function of N:P stoichiometry characteristics on the nutrient limitation on the sub-alpine grassland [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2014, 36(3): 79-83.
- [15] Zhou G, Zhou X, He Y, et al. Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23: 1167-1179.
- [16] 刘红梅, 卫智军, 杨静, 等. 不同放牧制度对荒漠草原表层土壤氮素空间异质性的影响[J]. *中国草地学报*, 2011, 33(2): 51-56.
- Liu Hongmei, Wei Zhijun, Yang Jing, et al. Effects of different grazing systems on spatial heterogeneity of nitrogen in top soil in desert steppe [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2011, 33(2): 51-56.
- [17] Du Y, Cui X, Cao G, et al. Simulating N₂O emission from *Kobresia humilis* Serg. alpine meadow on Tibetan Plateau with the DNDC model[J]. *Polish Journal of Ecology*, 2011, 59(3): 443-453.
- [18] 李英臣, 宋长春, 侯翠翠, 等. 不同氮输入对湿地草甸沼泽土 N₂O 排放和有机碳矿化的影响[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(11): 2091-2096.
- Li Yingchen, Song Changchun, Hou Cuicui, et al. Effect of nitrogen input on meadow marsh soil N₂O emission and organic carbon mineralization[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(11): 2091-2096.
- [19] 雷占兰, 周华坤, 刘泽华, 等. 气候变化对高寒草甸垂穗披碱草生育期和产量的影响[J]. *中国草地学报*, 2012, 34(5): 10-18.
- Lei Zhanlan, Zhou Huakun, Liu Zehua, et al. Effects of climate change on growth stages and yield of *Elymus nutans* in alpine meadow in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(5): 10-18.
- [20] Cardoso A D S, Brito L F D, Januskiewicz E R, et al. Grazing intensities and season affect N₂O emissions in a tropical pastureland[J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(1): 305.
- [21] 郭小伟, 杜岩功, 林丽, 等. 青藏高原北缘 3 种高寒草地的 CH₄、CO₂ 和 N₂O 通量特征的初步研究[J]. *草业科学*, 2016, 33(1): 27-37.
- Guo Xiaowei, Du Yangong, Lin Li, et al. CH₄, CO₂ and N₂O flux among three types of alpine meadow in the north regions of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(1): 27-37.
- [22] 梁艳, 干珠扎布, 张伟娜, 等. 灌溉对藏北高寒草甸生物量和温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(4): 801-808.
- Liang Yan, Ganzhu Zhabu, Zhang Weina, et al. Effects of irrigation on biomass and greenhouse gas emissions of alpine meadow in northern Tibet[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(4): 801-808.
- [23] Du Y, Guo X, Cao G, et al. Simulation and prediction of nitrous oxide emission by the water and nitrogen management model on the Tibetan plateau[J]. *Biochemical Systematics & Ecology*, 2016, 65: 49-56.

Effect of Simulated Nitrogen Deposition and Adding Precipitation and Its Interaction on Soil N₂O Emissions in Alpine Meadow

DU Yan-gong¹, CAO Ying-fang¹, ZHOU Geng², GUO Xiao-wei¹

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Science, Xining 810008, China;

2. Bureau of Weihai Agriculture Administration, Weihai 264411, China)

Abstract: The response characteristics of N₂O emissions rate to simulated nitrogen deposition and adding precipitation, and its interaction in alpine meadow on the Tibetan Plateau were studied. This manipulation was carried out with a static chamber-gas chromatograph at Haibei station in Qinghai province. It was revealed that nitrogen deposition and the interaction significantly increased grassland N₂O emission rates in the growing season. It increased by 145.9% and 193.5% than the control plot. Precipitation could raise soil N₂O emission rates by 27.2%, but it was not significantly different with the control plot. The highest emission rates reached $197.0 \pm 8.8 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ in June (interaction plots of nitrogen deposition and precipitation adding). However, the lowest value was about $3.1 \pm 0.23 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ during the late growing season in the control plot. Thus, the emission characteristics of N₂O emission showed significant temporal heterogeneity.

Key words: Simulated nitrogen deposition; Precipitation adding; Alpine meadow; N₂O emission

【责任编辑 胡卉芳】

欢迎订阅 2018 年《中国草地学报》

《中国草地学报》是由中国农业科学院草原研究所和中国草学会共同主办的国家级草学学术期刊，主要报道中国草学研究领域的新理论与重要成果，介绍新进展与发展动态，内容以草学基础理论研究和应用理论研究为主，兼纳高新技术研究和直接产生生态效益、经济效益的发育性研究，主要包括草原学、牧草学、草地学和草坪学等学科领域内有关草地与牧草资源、草地经营管理与改良利用、牧草遗传育种与引种栽培、牧草生理生化、草地建设与生态保护、草地生产与饲草料加工调制、草坪绿地、草业经济与可持续发展战略等。栏目主要有“专题报告”、“研究报告”、“综述与专论”、“研究简报”等。读者对象为从事草业科研、教学、生产和管理的专家、学者、院校师生、领导及业内中高级科技人员，也适合农学、畜牧学、林学、生态学、环境科学、地理科学等相关领域的科技人员阅读与参考。

本刊为中国草业领域创办最早的科技期刊，自 1979 年创刊以来先后荣获内蒙古、中国农业科学院、华北地区和全国农业等优秀期刊或优秀科技期刊奖 9 次，现为中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国农业核心期刊、RCCSE 中国核心学术期刊、中国科学引文数据库来源期刊，并被《中国知网》、《中国期刊网》、《中国核心期刊(遴选)数据库》、《万方数据—数字化期刊群》、《中文电子期刊资料服务库》、《中国科技论文与引文数据库》等多种数据库及二次文献收录，自 2008 年以来影响因子已超过 1.000，2016 年在中国科技期刊 CSCD 影响因子 300 名排行表中位居第 101 位。双月刊，大 16 开 A4 版本，120 页，国内外公开发售，每册定价 15.00 元，全年共 90.00 元。国内统一刊号 CN15—1344/S，国内邮发代号 16—32，全国各地邮局(所)均可订阅，错过订期可直接向本刊编辑部补订。

地址：呼和浩特市乌兰察布东街 120 号； 邮编：010010；

电话：0471—4928361 电子信箱：zgcdxb@126.com