

青藏高原氮沉降研究现状及草地生态系统响应研究进展

王伟^{1,2} 刘学军^{2*}

(1. 西藏农牧学院 资源与环境学院, 西藏 林芝 860000;

2. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193)

摘要 为了解青藏高原氮沉降的时空差异特征及对高原生态系统的影响,对青藏高原不同区域大气活性氮沉降定量研究的相关结果进行总结分析,对大气活性氮沉降对草地生态系统的影响并与青藏高原现阶段相关研究进行综述与比较。研究表明:青藏高原氮沉降通量定量研究较少,且局限于短期监测或仅定量雨水活性氮含量,长期性的定点原位监测、大气活性氮的组成特征、城乡差异及变化趋势均未见报道;同时,大气氮沉降对青藏高原草地生态系统植物多样性的影响,植物化学计量特征变化趋势及物候相应等均报道较少,仅局限于现象的解释,并未对变化机理进行阐述。氮沉降作为全球变化的主要驱动因子,青藏高原氮沉降通量及其对生态环境的影响有待进一步加强。

关键词 氮沉降; 植物响应; 土壤响应; 青藏高原

中图分类号 Q89

文章编号 1007-4333(2018)05-0151-08

文献标志码 A

Research progress on nitrogen deposition and grassland ecosystem response in Qinghai-Tibet Plateau

WANG Wei^{1,2}, LIU Xuejun^{2*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Xizang Agriculture and Animal Husbandry College, Linzhi 860000, China;

2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract In order to understand the characteristics of nitrogen deposition in the Qinghai-Tibet Plateau, references on atmospheric nitrogen deposition and its effect on the plateau ecosystem under the background of rapid economic development in Tibet region are reviewed. The results of previous atmospheric nitrogen deposition monitoring study in different areas of the Qinghai-Tibet Plateau are summarized. The effects of atmospheric nitrogen deposition on grassland ecosystems are summarized and compared. The results show that: The quantitative analysis of nitrogen deposition fluxes in the Qinghai-Tibet Plateau are relatively less, which are limited to short-term monitoring or only quantitative precipitation nitrogen content. Long-term situ monitoring, atmospheric reactive nitrogen composition characteristics, urban-rural differences and trends are still unknown; Plant diversity, plant stoichiometry and phenology under enhanced atmospheric nitrogen deposition in Qinghai-Tibet Plateau grassland are still unclear, especially the mechanism is ambiguous. Nitrogen deposition, as one of the main driving factors of global change, and its impact on the ecological environment in the Qinghai-Tibet Plateau needs to be further investigated.

Keywords nitrogen deposition; plant response; soil response; Qinghai-Tibet Plateau

氮(N)是自然界所有有机体生长的一种必需元素,在过去一个世纪由于受人为活动影响,全球大气活性氮含量增加了数倍,并通过干湿沉降进入生态系统,对不同地区、不同生态系统类型均产生了一定

收稿日期: 2017-05-19

基金项目: 国家杰出青年基金(40425007); 厅校联合基金(2016ZR-NQ-09)

第一作者: 王伟, 讲师, 博士研究生, 主要从事方向为大气氮沉降及其生态响应研究, E-mail: wwlxmq@163.com

通讯作者: 刘学军, 教授, 主要从事大气干湿沉降及其生态效应研究, E-mail: liu310@cau.edu.cn

的影响。我国活性氮排放由 1910 年的 920 万 t 增加到 2010 年的 5 600 万 t^[1],人为活动排放的活性氮占比达 80% 以上,我国氮沉降量由 1980 年的 13.2 kg/hm² 增加到 2000 年的 21.1 kg/hm²^[2],每年大气 N 沉降量高于 1 500 万 t。人类活动排放的不同形态的氮化合物已逐渐成为大气活性氮沉降的主要来源,对不同的生态环境产生了重要影响^[3]。全球大气活性氮沉降的增加作为改变陆地生态系统植物群落结构的重要驱动因子之一,已经引起了科研工作者的重视并进行了深入研究,包括土壤养分变化、土壤碳循环、植物生长变化、植物多样性演化、植物物候变化、凋落物分解等。青藏高原生态系统在全球变化研究中有着重要的生态学地位,对外界环境变化响应敏感,同时也对大气活性氮沉降增加敏感^[4]。本研究总结了青藏高原氮沉降通量的定量研究现状,综述了氮沉降对草地生态系统研究进展,并与青藏高原草地生态系统对氮添加的响应研究现状进行了比较,以期对青藏高原氮沉降进一步研究提供参考。

1 青藏高原氮沉降研究现状

大气氮沉降是指含氮化合物从大气中移出并落到地表面的过程,包括湿沉降与干沉降 2 种^[5]。工业革命以来,全球范围内大气活性 NO_x 增加了 3~6 倍,我国 NH₃ 排放量由 1980 年的 490 万 t/年(N) 增加到 2012 年的 800 万 t/年(N)^[6],化石燃料燃烧的 NO_x 排放量也由 1980 年的 110 万 t/年(N) 增加到 2010 年的 600 万 t/年(N)^[2],华北平原 2011—2014 年还原态氮沉降增加更为明显^[7];欧洲的大气氮沉降量在过去 20 年已呈明显减少趋势,美国大气氮沉降量也基本得到控制^[8]。青藏高原作为全球变化研究的重点区域之一,由于地广人稀,人为扰动较少,氮沉降的定量监测只有少量报道(表 1),且部分结果为基于模型产生,大气活性氮浓度及年度变化趋势均不明确,仅有拉萨市的定量研究表明大气活性氮沉降量由 2000 年的 1.11 kg/hm² (N) 增加到 2013 年的 20 kg/hm² (N);野外观测试验中,地域间差异也相对较大,色季拉山约为其他区域的 10 倍。

表 1 青藏高原氮沉降的时空特征差异研究

Table 1 Temporal and spatial differences of nitrogen deposition in the Qinghai-Tibet Plateau

采样地点 Sampling site	土地类型 Land use type	采样时间 Monitoring period	kg/(hm ² ·年)			
			NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ N	无机总氮 Total inorganic nitrogen	总氮沉降 Total nitrogen
拉萨 ^[9]	城镇	1998—2000	0.75	0.36	1.11	
林芝 ^[10]	城镇	2005—2006			2.36	
乃东 ^[10]	城镇	2006—2007	0.91	0.82	1.72	
比如 ^[10]	城镇	2006—2007	0.22	1.86	3.08	
阿里 ^[10]	城镇	2006—2007	1.11	0.8	1.91	
拉萨 ^[11]	城镇	2013				20
当雄 ^[11]	城镇	2013				15
西宁 ^[12]	城镇	2014—2015			25.6	
藏东南 ^[13]	野外	2011—2012	0.63	0.28	0.91	
纳木错 ^[13]	野外	2011—2012	0.68	0.24	0.92	
珠穆朗玛 ^[13]	野外	2011—2012	0.92	0.03	0.94	
色季拉山 ^[14]	野外	2012—2013			8.82	
阿里 ^[13]	野外	2013	0.36	0.08	0.44	

2 氮沉降对草地生态系统土壤系统的影响

2.1 对草原生态系统土壤碳循环的影响

土壤是陆地生态系统巨大的碳库,全球土壤有机碳含量在 1 300~1 600 Gt,是陆地生物量碳(664 Gt)的 2 倍^[15]。土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要环节,是陆地生态系统将碳素以 CO₂ 形式归还到大气的主要途径^[16]。我国草地生态系统土壤碳库约占总碳储量的 90%^[17],在碳循环对全球变化的响应和反馈过程中发挥着重要作用。施氮对温带典型草原草地表层土壤总有机碳及溶解性有机碳无显著影响,土壤颗粒态有机碳对氮添加响应敏感,氮添加不改变土壤总有机碳与可溶性有机碳随土壤深度增加呈递减趋势的分布规律,但降低了土壤总碳的垂直变异,增加了溶解性有机碳的变异规律^[18-19];氮添加显著增加植物活体有机碳库和凋落物碳库,而对根有机碳库的影响并不显著,地下部分总碳库和生态系统碳库未随氮沉降量的增大而发生显著改变^[20];氮添加增加了 CO₂ 通量与土壤温度水分的敏感性,在未来大气氮沉降增加的背景下,呼伦贝尔草甸草原 CO₂ 通量有可能会增加^[21]。

青藏高原属于气候变化的敏感区和生态脆弱带,对气候变化和人类活动扰动十分敏感,在未来全球碳循环调控中发挥着重要的作用。生态系统呼吸速率的变化主要来源于土壤温度和气温共同作用,施氮后,土壤温度和土壤水分成为 CO₂ 排放通量的主要控制因子,氮肥添加可使高寒草地土壤呼吸作用减弱^[22],低氮处理会显著增加土壤粗颗粒态有机碳和矿质结合态有机碳含量^[23]。也有研究表明,土壤矿质结合态有机碳对氮沉降不敏感^[24],高海拔或者高纬度地区,植物凋落物及地下死根不易分解,生态系统同化的有机碳可以较长时间地储存在地下根系和土壤中^[25]。

2.2 对草原生态系统土壤理化性质的影响

氮是草地稳定性和生产力的关键因素。基于温带草原的氮添加研究表明,土壤脲酶和蛋白酶活性随着氮沉降量的升高均呈先升高后降低的趋势^[26],施氮处理对过氧化氢酶活性影响不明显^[27];在高寒草甸区,氮添加与碱性磷酸酶有一定的正效应,与脲酶及纤维素酶有一定的负效应^[28];氮素输入对高寒草甸土壤氮矿化影响不显著,而对高寒草原和高寒湿地土壤氮矿化速率有促进作用^[29];同时,氮添加可以显著降低草原草甸的土壤 pH,在青藏高原研

究也有一致的结论^[30]。

2.3 对草原生态系统土壤微生物的影响

微生物作为土壤物质循环和生化过程的主要参与者与调节者,是陆地生态系统中最活跃的组分之一,全球陆地生态系统每年约有 270~450 亿 t 或更多的碳通过微生物分解作用进行循环,约占陆地生态系统向大气返还量的 1/2 以上^[31]。此外,土壤微生物作为稳定生态系统,监测土壤质量变化的敏感指标,其多样性研究在评价生态系统、维护生态平衡中也有巨大作用^[32]。研究表明,施氮显著降低生长季初期土壤微生物量,但促进了土壤细菌类群对多聚物、糖类、酚类和胺类碳源的利用及真菌类群对胺类碳源的利用^[33];一些研究^[34-35]已经证明,土壤 pH 显著改变微生物群落多样性,土壤 pH 在氮添加的条件下降低很可能是土壤微生物群落多样性降低的原因之一。但也有研究指出,随着氮添加量增加,土壤微生物总磷脂脂肪酸(PLFA)含量和土壤细菌 PLFA 生物标记数量、放线菌 PLFA 生物标记数量呈上升趋势,土壤真菌 PLFA 生物标记数量无显著差异,随氮添加量增加^[36],土壤细菌群落结构均随 N 梯度增加发生明显改变^[37]。

3 氮沉降对草地生态系统温室气体排放的影响

草地生态系统中自然状态产生的温室气体主要包括 CO₂、N₂O 和 CH₄ 等。在高海拔地区,冻融作用普遍且强烈,土壤冻融交替促进了反硝化作用,激发 CO₂、N₂O 的大量排放^[38-39]。高寒草甸中,草本植物是 CH₄ 排放源,而灌丛植物可以吸收 CH₄^[40]。氮添加可以抑制植物凋落物的分解,从而降低高寒草甸的呼吸作用引起的 CO₂ 排放量,但显著增加 N₂O 的排放量,抑制草地对 CH₄ 的吸收作用^[12],且硝态氮的效果高于铵态氮^[41]。

4 氮沉降对草地生态系统植物生长的影响

4.1 对草原植物同化物累积分配的影响

氮是多数生态系统中限制植物生长的关键营养元素之一。草地生产力对氮沉降响应一般受草地养分状况、草地退化程度、氮沉降量、植物种类、植物多样性、水分等因素的制约;氮输入一般会促进植物生长发育及地上生物量增加^[42]。基于温带草原的氮添加试验表明,不同草地植物生物量累积速度

对氮添加的响应各异, Xia 等^[43]研究表明, 随着氮添加的增加, 植物生物量下降; Turner^[44]研究表明, 氮添加对草地植物生物量影响不明显; Bai 等^[45]研究表明, 氮添加可以显著增加植物生产力, 退化草地中氮沉降则显著增加植物生物量累积速度^[46-47]; 物种丰富度较高的草地中, 植物生物量要明显较高^[48]; 植物地上部分生物量添加随着氮添加的升高而升高, 但氮输入量对植物生物量的促进作用存在一定的阈值, 阈值与草地退化程度有显著关系, 低于该值时氮对草地植被生产力有促进作用, 高于该值时植物生产力显著下降; Xu 等^[49]研究也表明, 草地对氮的储存吸收利用存在一定的饱和度, 过量氮肥添加会导致土壤退化, 植物生产力降低, 适量添加氮肥则会促进植物生物量累积; 氮沉降量对植物地上部分生物量影响高于氮沉降频率的影响^[50]; 但在控水控肥试验条件下, 单纯氮添加对植物地上部分净生物量无显著影响, 氮、水同时添加可显著增加植物地上部分生物量^[51]。针对青藏高原草甸的研究也表明, 氮添加对植物叶片的氮含量及植物光合速率均有显著的正效应^[52], 由于青藏高原草地生态系统多为氮限制型生态系统, 氮沉降的变化尤其是进一步增加, 可能会引起生态系统初级生产力增加进而打破现有平衡。

4.2 对草原植物多样性的影响

N 沉降可显著引起植物多样性丧失^[53], 主要有 2 种原因, 一种为喜氮植物的快速生长使得植被光透性降低, 由于植物光竞争使得植物多样性丧失^[54-55]; 另一种为氮添加使得土壤酸化, 使得一部分植物不适宜生长导致植物多样性丧失; 不同植物类型之间对氮素利用效率不一样, 添加的氮素通过提高植物群落中少数优势植物的优势度从而改变植物群落的结构, 从而导致物种丰富度^[56]、多样性下降^[52], Fisher 等^[57]研究表明, 施氮区草本植物的盖度比对照区高 30%, 豆科植物的盖度比对照降低 52%。祁瑜等^[19]研究显示, 施氮没有改变豆科植物生物量分配格局, 而对禾本科植物影响明显。N 沉降可以显著降低草原植被中植物的多样性^[43], 长期小剂量施氮对物种多样性的降低更为明显, 氮沉降引起的植物物种多样性降低主要是由土壤酸化以及铵盐的毒害作用导致^[58]; 草地生态系统生物多样性对氮添加的响应, 受氮输入水平、土壤养分状况、持续时间等制约^[59], 草原植被中, 氮沉降可以显著增加禾本科植物的重要值, 降低非禾本科植物的重要

值, 长期 10(kg/(hm²·年))(N) 氮添加, 环境氮沉降量为 6(kg/(hm²·年))(N), 即可导致 17% 的物种多样性丧失, 而停止 N 处理后, 草原植物物种丰富度与多样性均出现了一定程度的恢复^[60-61]; 此外, 氮沉降还可以显著改变植物的物候^[62], 使灌丛植物的花期延长, 非禾本科植物的花期变短^[63];

针对青藏高原高寒草甸的研究表明, 氮添加对植物群落结构有显著影响, 表现为物种数下降, 总盖度升高, 物种多样性下降^[64]; 低氮添加使菊科植物盖度上升, 高氮添加使得禾本科植物盖度上升^[65]; 氮添加改变了植物群落物种多样性^[66], 显著降低了青藏高原草地群落中物种丰富度^[67], 与其他草地生态系统研究结论相似; 氮沉降增加会引起植物物候的变化, 不同物种敏感性不同^[68]。

5 氮沉降对草地生态系统凋落物分解的影响

凋落物是植物生长发育过程中的产物, 是草地生态系统的重要组成部分, 推动着土壤有机质的矿化分解和土壤养分的循环与转化, 对维持草原生态系统过程和功能具有重要作用^[69]。在陆地生态系统中, 90% 以上的地上部分净生产量通过凋落物的方式返回地表, 是分解者物质和能量的主要来源^[70]。草原凋落物的分解影响着草原植物萌发、群落结构和植被演替^[71], Kuperman^[72] 研究认为植物种类影响着凋落物分解的速度, 氮沉降引起的草原植物物种组成的变化使得凋落物的质量与可分解性完全转变^[73]。在青藏高原地区, 也有零星报道指出, 氮沉降会对凋落物分解产生抑制作用^[24]。

6 问题与展望

综上所述, 青藏高原氮沉降通量监测及氮沉降的生态环境效应研究已经取得了一定的进展。青藏高原现阶段氮沉降通量正在呈增加趋势, 氮沉降通量的增加可能会促进高寒草甸生态系统初级生产力, 引发植物物种数及多样性下降, 总盖度升高等一系列响应; 但青藏高原氮沉降的定量研究较少, 同时受限于实验条件, 部分研究通过测定雨水中的氮含量以估算大气氮沉降量, 青藏高原氮沉降通量的地域差异及年度变化趋势仍无准确的量化结论。今后在以下研究中需要进一步加强: 1) 西藏经济现阶段高速增长, 大气活性氮含量与社会经济发展水平一定范围内呈正相关, 在人类活动影响密集区域应开

展长期定点大气活性氮监测试验,以阐明人类活动对青藏高原大气活性氮沉降组成影响及年度变化特征,同时了解青藏高原大气活性氮沉降的城乡差异,以精准量化青藏高原氮沉降通量及其变化趋势。2)在量化青藏高原氮沉降通量的基础上,设置相应的模拟氮添加试验评估氮沉降对青藏高原草地土壤及植物的影响。3)氮沉降通量的增加是否会引起青藏高原草地生态系统植物化学计量特征的改变,使得青藏高原草地生态系统由氮限制性转变为其他营养元素限制型生态系统。

参考文献 References

- [1] Cui S, Shi Y, Groffman P M, Schlesinger W H, Zhu Y G. Centennial-scale analysis of the creation and fate of reactive nitrogen in China (1910–2010)[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(6):2052-2057
- [2] Liu X J, Duan L, Mo J M, Du E Z, Shen J L, Lu X K, Zhang Y, Zhou X B, He C, Zhang F S. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10):2251-2264
- [3] Liu X J, Zhang Y, Han W X, Tang A H, Shen J L, Cui Z L, Vitousek P, Erisman J W, Goulding K, Christie P, Fangmeier A, Zhang F S. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438):459-462
- [4] Liu Y W, Ri X, Xu X X, Wei D, Wang Y H, Wang Y S. Plant and soil responses of an alpine steppe on the Tibetan Plateau to multi-level nitrogen addition[J]. *Plant and Soil*, 2013, 373(1):515-529
- [5] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, Boyer E W, Howarth R W, Seitzinger S P, Asner G P, Cleveland C C, Green P A, Holland E A, Karl D M, Michaels A F, Porter J H, Townsend A R, Vöösmary C J. Nitrogen cycles: Past, present, and future [J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2):153-226
- [6] Kang Y N, Liu M X, Song Y, Huang X, Yao H, Cai X H, Zhang H S, Kang L, Liu X J, Yang X Y, He H, Zhang Q, Shao M, Zhu T. High-resolution ammonia emissions inventories in China from 1980 to 2012 [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2016, 15(19):26959-26995
- [7] 许稳. 中国大气活性氮干湿沉降与大气污染减排效应研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2016
- Xu W. Studies on dry and wet deposition of atmospheric reactive nitrogen and air pollution control effects in China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [8] Li Y, Schichtel B A, Walker J T, Schwede D B, Chen X, Lehmann C M, Puchalski M A, Gay D A, Jeffrey L C. Increasing importance of deposition of reduced nitrogen in the United States[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(21):5874-5879
- [9] Zhang D D, Peart M, Jim C Y, He Y Q, Li B S, Chen J A. Precipitation chemistry of Lhasa and other remote towns, Tibet [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(2):231-240
- [10] 贾钧彦. 西藏高原大气氮湿沉降研究 [D]. 拉萨: 西藏大学, 2008
- Jia J Y. Study on atmospheric nitrogen wet deposition in Tibet Plateau [D]. Lhasa: Tibet University, 2008 (in Chinese)
- [11] Zhu J X, He N P, Wang Q F, Yuan G F, Wen D, Yu G R, Jia Y L. The composition, spatial patterns, and influencing factors of atmospheric wet nitrogen deposition in Chinese terrestrial ecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 511(4):777-785
- [12] 许稳, 金鑫, 罗少辉, 冯兆忠, 张霖, 潘月鹏, 刘学军. 西宁近郊大气氮干湿沉降研究 [J]. 环境科学, 2017, 38(4):1279-1288
- Xu W, Jin X, Luo S H, Feng Z Z, Zhang L, Pan Y P, Liu X J. Dry and bulk nitrogen deposition in suburbs of Xining City [J]. *Environment Science*, 2017, 38(4):1279-1288 (in Chinese)
- [13] Liu Y W, Ri X, Wang Y S, Pan Y P, Piao S L. Wet deposition of atmospheric inorganic nitrogen at five remote stations on the Tibetan Plateau [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2015, 15(20):11683-11700
- [14] 刘智媛, 周筠珺, 李瀚, 韩琳. 藏东南森林穿透雨氮沉降通量变化特征及其影响因子 [J]. 气象科技, 2016, 44(5):834-840+853
- Liu Z Y, Zhou J J, Li H, Han L. Variation features of nitrogen deposition flux in forest throughfall and its influencing factors in southeastern Tibet [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2016, 44(5):834-840+853 (in Chinese)
- [15] Lashof D A. The dynamic greenhouse: Feedback processes that may influence future concentrations of atmospheric trace gases and climatic change [J]. *Climatic Change*, 1989, 14(3):213-242
- [16] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 董云社, 王智平, 熊小刚, 阎志丹. 土壤呼吸对温度升高的适应 [J]. 生态学报, 2004, 24(11):2649-2655
- Chen Q S, Li L H, Han X G, Dun Y S, Wang Z P, Xiong X G, Yan Z D. Acclimatization of soil respiration to warming [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11):2649-2655 (in Chinese)
- [17] Pei Z Y, Hua O Y, Zhou C P, Xu X L. Carbon balance in an alpine steppe in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2009, 51(5):521-526
- [18] 齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛. 温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应 [J]. 环境科学, 2014, 35(8):3073-3082
- Qi Y C, Peng Q, Dun Y S, Xiao S S, Sun L J, Liu X C, He Y T, Jia J Q, Cao C C. Responses of soil total organic carbon and dissolved organic carbon to simulated nitrogen deposition in temperate typical steppe in inner Mongolia, China [J]. *Environment Science*, 2014, 35(8):3073-3082 (in Chinese)
- [19] 祁瑜, Mulder J, 段雷, 黄永梅. 模拟氮沉降对克氏针茅草原土

- 壤有机碳的短期影响[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 1104-1113
- Qi Y, Mulder J, Duan L, Huang Y M. Short-term effects of simulating nitrogen deposition on soil organic carbon in a Stipakrylovii steppe[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(4): 1104-1113 (in Chinese)
- [20] 康俊霞, 王瑞珍, 寻芬, 张光明, 谭增涛, 白文明. 长期氮素添加对内蒙古典型草原有机碳库的影响[J]. 中国草地学报, 2014, 36(1): 79-83
- Kang J X, Wang R Z, Xun F, Zhang G M, Tan Z T, Bai W M. Effects of long-term nitrogen addition on organic carbon storage in typical steppe in inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2014, 36(1): 79-83 (in Chinese)
- [21] Liu X R, Zhang L M, Zhang C H, Ren J Q, Li S G. Effects of simulated NH_4^+ deposition on CO_2 fluxes in the Hulun Buir meadow steppe of inner Mongolia, China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2015, 6(3): 129-138
- [22] Jiang C M, Yu G R, Fang H J, Cao G M, Li Y N. Short-term effect of increasing nitrogen deposition on CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(24): 2920-2926
- [23] 李林森, 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 徐敏杰, 王永生, 党旭升, 李英年. 氮素富集对青藏高原高寒草甸土壤有机碳迁移和累积过程的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 183-193
- Li L S, Cheng S L, Fang H J, Yu G R, Xu M J, Wang Y S, Dang X S, Li Y N. Effects of nitrogen enrichment on transfer and accumulation of soil organic carbon in alpine meadows on the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(1): 183-193 (in Chinese)
- [24] 郑娇娇, 方华军, 程淑兰, 于贵瑞, 张裴雷, 徐敏杰, 李英年. 增氮对青藏高原东缘典型高寒草甸土壤有机碳组成的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5363-5372
- Zheng J J, Fang H J, Cheng S L, Yu G R, Zhang P L, Xu M J, Li Y N. Effects of N addition on soil organic carbon components in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5363-5372 (in Chinese)
- [25] Shi P L, Sun X M, Xu L L, Zhang X Z, He Y T, Zhang D Q, Yu G R. Net ecosystem CO_2 exchange and controlling factors in a steppe, Kobresia meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(2): 207-218
- [26] 于济通, 陶佳慧, 马小凡, 李琳慧, 王观竹, 郭平. 冻融作用下模拟氮沉降对土壤酶活性与土壤无机氮含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 518-523
- Yu J T, Tao J H, Ma X F, Li L H, Wang G Z, Guo P. Effects of simulated nitrogen deposition on enzymatic activities and inorganic nitrogen contents in soil during freeze - thaw cycles [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3): 518-523 (in Chinese)
- [27] 白春华, 红梅, 韩国栋, 赵萌莉, 卢秉韬. 土壤三种酶活性对温度升高和氮肥添加的响应[J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2012, 43(5): 509-513
- Bai C H, Hong M, Han G D, Zhao M L, Lu B T. Response of three kinds of enzyme activity to simulate warming and nitrogen addition [J]. *Journal of Inner Mongolia University: Natural Science Edition*, 2012, 43(5): 509-513 (in Chinese)
- [28] 孙亚男, 李茜, 李以康, 林丽, 杜岩功, 曹广民. 氮、磷养分添加对高寒草甸土壤酶活性的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(2): 18-26.
- Sun Y N, Li Q, Li Y K, Lin L, Du Y G, Cao G M. The effect of nitrogen and phosphorus applications on soil enzyme activities in Qinghai-Tibetan alpine meadows [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(2): 18-26 (in Chinese)
- [29] Bai J B, Xu X L, Fu G, Song M H, He Y T, Jiang J. Effects of temperature and nitrogen input on nitrogen mineralization in alpine soils on Tibetan Plateau [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2011, 12(12): 1909-1912
- [30] 张涛. 藏北高寒草甸土壤和植被对外源碳、氮添加及围封、刈割的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2016
- Zhang T. Effects of carbon and nitrogen addition, fencing and mowing on soil and vegetation of alpine meadow in Northern Tibet[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016 (in Chinese)
- [31] 杨钙仁, 童成立, 张文菊, 吴金水. 陆地碳循环中的微生物分解作用及其影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 605-609
- Yang G R, Tong C L, Zhang W J, Wu J S. Decomposition of organic matter by soil microorganisms in terrestrial carbon cycling and its influence factors [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(4): 605-609 (in Chinese)
- [32] 张薇, 魏海雷, 高洪文, 胡跃高. 土壤微生物多样性及其环境影响因子研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(1): 48-52
- Zhang W, Wei H L, Gao H W, Hu Y G. Advances of studies on soil microbial diversity and environmental impact factors [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(1): 48-52 (in Chinese)
- [33] 么中元, 张乃莉, 崔喜艳. 火烧和施氮对内蒙古半干旱草原土壤微生物群落碳源利用潜力的影响[J]. 草地学报, 2014, 22(4): 713-721
- Yao Z Y, Zhang N L, Cui X Y. Impacts of fire and N addition on microbial C utilization potential in a semi-arid grassland of Inner Mongolia [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(4): 713-721 (in Chinese)
- [34] Steenwerth K L, Jackson L E, Calderón F J, Stromberg M R, Scow K M. Soil microbial community composition and land use history in cultivated and grassland ecosystems of coastal California [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(11): 1599-1611
- [35] Bååth E, Anderson T H. Comparison of soil fungal/bacterial ratios in a pH gradient using physiological and PLFA-based techniques [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(7): 955-963
- [36] 施瑶, 王忠强, 张心昱, 孙晓敏, 刘希玉, 何念鹏, 庾强. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原土壤微生物群落结构的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4943-4949
- Shi Y, Wang Z Q, Zhang X Y, Sun X M, Liu X Y, He N P, Yu

- Q. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial community composition in temperate typical grassland in Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17): 4943-4949 (in Chinese)
- [37] 杨山, 李小彬, 王汝振, 蔡江平, 徐柱文, 张玉革, 李慧, 姜勇. 氮水添加对中国北方草原土壤细菌多样性和群落结构的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 739-746
Yang S, Li X B, Wang R Z, Cai J P, Xu Z W, Zhang Y G, Li H, Jiang Y. Effects of nitrogen and water addition on soil bacterial diversity and community structure in temperate grasslands in northern China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 739-746 (in Chinese)
- [38] Priemé A, Christensen S. Natural perturbations, drying-wetting and freezing-thawing cycles, and the emission of nitrous oxide, carbon dioxide and methane from farmed organic soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(15): 2083-2091
- [39] Sharma S, Szele Z, Schilling R, Munch J C, Schloter M. Influence of freeze-thaw stress on the structure and function of microbial communities and denitrifying populations in soil[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72(3): 2148-2154
- [40] Cao G M, Xu X L, Long R J, Wang Q L, Wang C T, Du Y G, Zhao X Q. Methane emissions by alpine plant communities in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Biology Letters*, 2008, 4(6): 681-684
- [41] 马钢, 王平, 王冬雪, 徐世权. 高寒灌丛土壤温室气体释放对添加不同形态氮素的响应[J]. *草业学报*, 2015, 24(3): 20-29
Ma G, Wang P, Wang D X, Xu S Q. Response of soil greenhouse gas emissions to different forms of nitrogen in alpine shrub ecosystems[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(3): 20-29 (in Chinese)
- [42] Lee M, Manning P, Rist J, Power S A, Marsh C. A global comparison of grassland biomass responses to CO₂ and nitrogen enrichment[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 365(1549): 2047-2056
- [43] Xia J, Wan S. Global response patterns of terrestrial plant species to nitrogen addition[J]. *New Phytologist*, 2008, 179(2): 428-439
- [44] Turner C L, Knapp A K. Responses of a C₄ grass and three C₃ forbs to variation in nitrogen and light in tallgrass prairie[J]. *Ecology*, 1996, 77(6): 1738-1749
- [45] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, Naeem S, Pan Q M, Huang J H, Zhang L X, Han X G. Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: Evidence from Inner Mongolia Grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 358-372
- [46] Gargano A O, Adúriz M A, Saldungaray M C. Yield and quality of fertilized deferred forage of *Digitaria eriantha* and *Eragrostis curvula*[J]. *Journal of Arid Environments*, 2001, 47(2): 181-189
- [47] Jaramillo V J, Detling J K. Small-scale heterogeneity in a semi-arid North American grassland. I. Tillering, N uptake and retranslocation in simulated urine patches [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1992, 29(1): 1-8
- [48] Reich P B, Knops J, Tilman D, Craine J, Ellsworth D, Tjoelker M, Lee T, Wedin D, Naeem S, Bahaeddin D, Hendrey G, Jose S, Wragge K, Goth J, Bengtson W. Plant diversity enhances ecosystem responses to elevated CO₂ and nitrogen deposition [J]. *Nature*, 2001, 410(6830): 809-810
- [49] Xu X T, Liu H Y, Song Z L, Wang W, Hu H Z, Qi Z H. Response of aboveground biomass and diversity to nitrogen addition along a degradation gradient in the Inner Mongolian steppe, China[J]. *Scientific Reports*, 2015(5): 10284
- [50] Zhang Y H, Feng J C, Isbell F, Lu X T, Han X G. Productivity depends more on the rate than the frequency of N addition in a temperate grassland[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(4): 12558
- [51] Lü X T, Dijkstra F A, Kong D L, Wang Z W, Han X G. Plant nitrogen uptake drives responses of productivity to nitrogen and water addition in a grassland[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4817
- [52] 司晓林, 王文银, 高小刚, 徐当会. 氮硅添加对高寒草甸垂穗披碱草叶片全氮含量及净光合速率的影响[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(12): 1238-1244
Si X L, Wang W Y, Gao X G, Xu D H. Effects of nitrogen and silicon application on leaf nitrogen content and net photosynthetic rate of *Elymus nutans* in alpine meadow [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(12): 1238-1244 (in Chinese)
- [53] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, Gowing D J. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands[J]. *Science*, 2004, 303(5665): 1876-1879
- [54] Hautier Y, Niklaus P A, Hector A. Competition for light causes plant biodiversity loss after eutrophication[J]. *Science*, 2009, 324(5927): 636-638
- [55] Fynn R W S, Morris C D, Edwards T J. Long-term compositional responses of a South African mesic grassland to burning and mowing[J]. *Applied Vegetation Science*, 2009, 8(1): 5-12
- [56] Foster B L, Gross K L. Species richness in a successional grassland: Effects of nitrogen enrichment and plant litter[J]. *Ecology*, 1998, 79(8): 2593-2602
- [57] Fisher F M, Zak J C, Cunningham G L, Whitford W G. Water and nitrogen effects on growth and allocation patterns of creosotebush in the northern Chihuahuan desert[J]. *Journal of Range Management*, 1988, 41(5): 387-391
- [58] Zhang Y, Lü X, Isbell F, Stevens C, Han X, He N P, Zhang G M, Yu Q, Huang J H, Han X G. Rapid plant species loss at high rates and at low frequency of N addition in temperate steppe[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3520-3529
- [59] Matson P, Lohse K A, Hall S J. The globalization of nitrogen deposition; consequences for terrestrial ecosystems[J]. *Ambio*

- A Journal of the Human Environment*, 2002, 31(2): 113-119
- [60] Song L, Bao X, Liu X, Zhang Y, Christie P, Fangmeier A, Zhang F. Nitrogen enrichment enhances the dominance of grasses over forbs in a temperate steppe ecosystem [J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(8): 2341-2350
- [61] Clark C M, Tilman D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands [J]. *Nature*, 2008, 451(7179): 712-715
- [62] Cleland E E, Chiariello N R, Loarie S R, Mooney H A, Field C B. Diverse responses of phenology to global changes in a grassland ecosystem [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(37): 13740-13744
- [63] Phoenix G K, Emmett B A, Britton A J, Caporn S J M, Dise N B, Helliwell R, Jones L, Leake J R, Leith L D. Impacts of atmospheric nitrogen deposition: responses of multiple plant and soil parameters across contrasting ecosystems in long-term field experiments [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(4): 1197-1215
- [64] 李长斌, 彭云峰, 赵殿智, 宁伟, 周国英. 降水变化和氮素添加对青藏高原高寒草原群落结构和物种多样性的影响 [J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 185-191
- Li C B, Peng Y F, Zhao D Z, Ning W, Zhou G Y. Effects of precipitation change and nitrogen addition on community structure and plant diversity in an alpine steppe on the Qinghai-Tibetan plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(6): 185-191 (in Chinese)
- [65] 宗宁, 柴曦, 石培礼, 蒋婧, 牛犇, 张宪洲, 何永涛. 藏北高寒草甸群落结构与物种组成对增温与施氮的响应 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3739-3748
- Zong N, Chai X, Shi P L, Jiang J, Niu B, Zhang X Z, He Y T. Responses of plant community structure and species composition to warming and N addition in an alpine meadow, northern Tibetan Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(12): 3739-3748 (in Chinese)
- [66] Ren Z W, Li Q, Chu C J, Zhao L Q, Zhang J Q, Ai D X C, Yang Y B, Wang G. Effects of resource additions on species richness and ANPP in an alpine meadow community [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2010, 3(1): 25-31
- [67] 张杰琦, 李奇, 任正炜, 杨雪, 王刚. 氮素添加对青藏高原高寒草甸植物群落物种丰富度及其与地上生产力关系的影响 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1125-1131
- Zhang J Q, Li Q, Ren Z W, Yang X, Wang G. Effects of nitrogen addition on species richness and relationship between species richness and aboveground productivity of alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(10): 1125-1131 (in Chinese)
- [68] 杨月娟, 张灏, 周华坤, 叶鑫, 姚步青, 张春辉, 马真, 赵新全. 青藏高原高寒草甸花期物候和群落结构对氮、磷、钾添加的短期响应 [J]. 草业学报, 2015, 24(8): 35-43
- Yang Y J, Zhang H, Zhou H K, Ye X, Yao B Q, Zhang C H, Ma Z, Zhao X Q. Short-term responses of flowering phenology and community structure to nitrogen phosphorus and potassium in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(8): 35-43 (in Chinese)
- [69] Rovira P, Rovira R. Fitting litter decomposition datasets to mathematical curves: Towards a generalized exponential approach [J]. *Geoderma*, 2010, 155(3): 329-343
- [70] Loranger G, Ponge J F, Imbert D, Lavelle P. Leaf decomposition in two semi-evergreen tropical forests: Influence of litter quality [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 247-252
- [71] Facelli J M, Pickett S T A. Plant litter: its dynamics and effects on plant community structure [J]. *The Botanical Review*, 1991, 57(1): 1-32
- [72] Kuperman R G. Litter decomposition and nutrient dynamics in oak-hickory forest s along a historic gradient of nitrogen and sulfur deposition [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(2): 237-244
- [73] 徐振锋, 尹华军, 赵春章, 曹刚, 万名利, 刘庆. 陆地生态系统凋落物分解对全球气候变暖的响应 [J]. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1208-1219
- Xu Z F, Yin H J, Zhao C Z, Cao G, Wan M L, Liu Q. A review of responses of litter decomposition in terrestrial ecosystems to global warming [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(6): 1208-1219 (in Chinese)

责任编辑: 王燕华