

引用格式:王霞,杜岩功,郭小伟. Meta分析模拟氮沉降对我国北方草地氧化亚氮排放速率的影响[J]. 山地学报,2021,39(3):338-345.
WANG Xia, DU Yangong, GUO Xiaowei. Effect of nitrogen deposition on grasslands nitrous oxide emission rates by Meta-analysis method in China [J]. Mountain Research, 2021, 39(3):338-345.

Meta分析模拟氮沉降对我国北方草地氧化亚氮排放速率的影响

王霞¹, 杜岩功^{2*}, 郭小伟²

(1. 莱芜职业技术学院 园林工程技术教研室, 山东 莱芜 271100; 2. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘要: 氧化亚氮(N₂O)是三大温室气体之一,氮沉降显著提高土壤氮素供给水平,可能会大幅增加草地生态系统 N₂O 排放速率。北方草地是我国重要的生态安全屏障和畜牧业基地,但目前有关氮沉降对我国北方草地生态系统 N₂O 排放速率的影响强度及主要调控因素尚不清楚。本研究采用 Meta 方法,通过对中国北方草地已开展的 32 个实验结果进行综合分析。结果发现:模拟氮沉降对中国草地生态系统 N₂O 排放的平均效应值为 0.82 ± 0.11 (95% 置信区间 0.61 ~ 1.02),氮沉降极显著地增加了我国草地 N₂O 排放速率($P < 0.001$)。不同氮素类型对平均效应值存在显著性影响,顺序依次为硫酸铵、尿素、硝酸钠、硝酸铵、家畜尿液。施用氮素剂量、土壤有机碳含量、气温和海拔对平均效应值均具有显著性影响,氮素剂量和土壤有机质含量可以解释效应值变异的 47.31% 和 45.27%。氮沉降的平均效应值与氮素剂量和气温之间存在极显著正相关关系,而与土壤有机碳和海拔间存在极显著负相关关系。通过对退化草地的恢复治理、提高土壤有机碳含量可大幅降低氮沉降对我国草地生态系统 N₂O 排放的激发效应。

关键词: 氮沉降; Meta 分析; 草地生态系统; 随机效应模型; 平均效应值

中图分类号: Q148

文献标志码: A

人为活动导致大气氮沉降显著升高,过去 30 多年以来,中国工业和农业生产活动加剧,我国成为全世界氮沉降量最高的国家之一^[1-3]。中国大气氮沉降量正在以每年平均 8 kg · N · ha⁻¹ 速度增加^[4]。目前,受大气温室气体浓度不断上升影响,全球变暖仍在持续,2020 年全球平均温度比工业化前高 1.2 °C,是有仪器记录以来温度第三高的年份^[5]。N₂O 是一种重要的温室气体,2019 年全球 N₂O 浓度为 332.0 ppb^[6],该浓度为工业革命前的 1.23 倍等摩尔浓度增温潜势为 CO₂ 的 265 倍,因对全球增温

具有长期潜在深远影响而受到广泛关注^[7]。

探索大气氮沉降对草地生态系统 N₂O 排放速率的影响和调控因素,为延缓大气温室气体 N₂O 浓度增加提供科学依据。草地生态系统由于其较强的碳、氮吸收能力,可以显著影响全球气候环境变化^[1,5]。中国草地面积约占国土面积的 41.7%,是我国主体植被类型之一^[8]。草地生态系统 N₂O 主要是通过硝化和反硝化作用生成,这也是土壤氮素损失的重要途径^[2]。氮沉降会适度增加草地土壤氮素底物含量,可能会激发参与土壤硝化与反硝化

收稿日期(Received date):2020-07-27; 改回日期(Accepted date):2021-04-05

基金项目(Foundation item):国家自然科学基金(31770532);中国科学院西部之光西部青年学者项目[National Natural Science Foundation of China(31770532); Youth Scholar Project of Western Light of Chinese Academy of Sciences]

作者简介(Biography):王霞(1982-),女,山东淄博人,硕士,讲师,主要研究方向:草地生态系统氮素循环及其环境效应。[WANG Xia(1982-), female, born in Zibo, Shandong province, M. Sc., lecturer, researched on grassland nitrogen cycling and its environment effects] E-mail: 825252@163.com

* 通讯作者(Corresponding author):杜岩功(1981-),男,博士,研究员,主要研究方向:草地生态系统与全球变化。[DU Yangong(1981-), male, Ph. D., professor, specialized in grasslands ecosystems and global change] E-mail: ygdu@nwipb.cas.cn

过程的微生物氮素吸收能力,提高草地生态系统 N_2O 排放量^[1,4,9]。内蒙古克氏针茅草原 N_2O 年排放量与模拟氮沉降量呈线性增加关系,高氮 (25 和 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 处理排放量分别为对照的 2.2 和 2.8 倍^[2]。新疆天山高寒草地氮素剂量为 $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 时对 N_2O 排放速率无显著性影响 (增加幅度为 35.48%), 但剂量增加到 $3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 时, 显著增加高寒草地 N_2O 排放速率 (增加幅度为 95.06%)^[4]。青藏高原高寒草甸模拟氮沉降 $2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 对 N_2O 排放速率增加幅度约 145.9%^[9]。因草地类型差异及不同环境因素影响, 氮沉降对草地生态系统影响存在较大空间异质性。

目前有关我国北方草地生态系统 N_2O 排放速率对模拟氮沉降的响应特征研究, 多为单一样点研究结果, 尚缺乏区域尺度草地生态系统 N_2O 排放通量对氮沉降响应特征及调控因素的研究报道。因此, 本研究以我国北方草地生态系统为研究对象, 基于 Meta 分析方法, 探索氮沉降对我国草地 N_2O 排放速率的影响强度, 回答如何准确定量我国北方草地生态系统 N_2O 排放速率对模拟氮沉降的响应强度, 这一科学问题。此外, 基于混合效应模型, 解析平均效应值与土壤理化性质之间、环境因子及氮素类型的耦合关系, 探索氮沉降背景下, 中国草地生态系统 N_2O 适宜的减排策略, 为缓解全球气候变化提供科技支撑。

1 研究方法

1.1 Meta 分析数据收集

通过中国知网数据库 (CNKI), 检索关键词“氮沉降”和“草地”或“草原”或“草甸”和“氧化亚氮”或“ N_2O ”, 总共搜索到 15 篇论文。按照如下准则进行文章筛选: 研究对象为中国北方草地, N_2O 排放速率通过密闭箱气相色谱法测定, 试验均在生长季开展。本研究收集草地生态系统 N_2O 排放速率; 气象因素包括年均气温和降水量; 环境因素和土壤理化性状包括海拔、氮素剂量、土壤有机质、全氮、pH 值、容重。本论文统计分析引用 10 篇包含 32 组研究数据, 研究样点主要分布在内蒙古、西藏、新疆、青海和河北省。对于论文发表的图片数据, 采用 WebPlotDigitizer 软件进行数据提取^[5]。

1.2 平均效应值及效应值异质性检验方法

(1) 放牧干扰对单一处理效应值 (反应比)^[10-11] 的计算公式为:

$$\ln R = \ln \frac{x_e}{x_c} = \ln(x_e) - \ln(x_c) \quad (1)$$

式中, $\ln R$ 为效应值; x_c 和 x_e 分别为对照和处理的平均值。

(2) 各处理的研究组内方差的计算公式为:

$$V_{\ln R} = \frac{S_e^2}{N_e x_e^2} + \frac{S_c^2}{N_c x_c^2} \quad (2)$$

式中, $V_{\ln R}$ 为研究组内方差; S_e 和 S_c 分别为处理与对照的标准差; N_e 和 N_c 为处理和对照样本量。

(3) 单一研究结论的权重值计算公式为:

$$w_i^* = 1/(v_i + \tau^2) \quad (3)$$

式中, w_i^* 为权重值; v_i 和 τ^2 分别为研究组内方差和研究组间方差。

(4) Meta 分析放牧处理效应的平均效应值计算采用随机效应模型方法, 计算公式为:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^k w_i^* y_i}{\sum_{i=1}^k w_i^*} \quad (4)$$

式中, \bar{y} 为平均效应值; y_i 为单一研究的效应值。

(5) 放牧对我国北方草地 N_2O 排放速率影响的平均效应值的总体标准误差计算公式为:

$$SE = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k w_i^*}} \quad (5)$$

式中, SE 为标准误差; i 和 k 分别为研究结果 i 到 k 。

(6) 采用标准误差估算放牧处理平均效应值的 95% 置信区间, 计算公式为:

$$CI = \bar{y} \pm 1.96SE \quad (6)$$

式中, CI 为置信区间。

(7) 效应值数据整体异质性检验计算公式为:

$$Q_i = \sum_{i=1}^k w_i^* (y_i - \bar{y})^2 \quad (7)$$

式中, Q_i 为异质性检验值。如果数据均质, 那么 Q_i 应该服从自由度为 $k-1$ 的卡方分布, 不服从时需要引入解释变量。

(8) 解释变量的影响程度检验采用混合效应 (随机因素和解释变量) 模型计算:

$$Q_m = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^{n_j} w_i^* (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (8)$$

式中, Q_m 为解释变量影响检验值; j 和 i 分别代表处

理和对照研究; n_i 和 p 表示处理样本量和解释变量异质性检验值; y_{ij} 表示引入解释变量后的单一研究效应值。

1.3 数据统计分析

Meta分析基于R语言metafor程序开展(3.6.1版本)。基于随机效应模型(rma程序包)进行单个研究的效应值和平均效应值的计算。当该研究的效应值整体异质性较强时,即 Q_i 值较高($P < 0.05$),需要采用混合效应模型(mods程序包),引入解释变量对异质性进行统计分析。通过漏斗图对称性检验结果,分析本研究发表偏差性。

2 结果与分析

2.1 氮沉降对我国北方草地 N_2O 排放速率影响

氮沉降对我国北方草地生态系统 N_2O 排放速率影响的平均效应值为 0.82 ± 0.11 (95%置信区间 $0.61 \sim 1.02$,图1)。这也表明氮沉降极显著地激发了我国草地生态系统 N_2O 排放($P < 0.001$)。氮沉降对我国北方草地生态系统 N_2O 排放速率影响的效应值异质性检验 Q_i 值为64 653.16(自由度 $df = 31$),表明该研究异质性较强($P < 0.0001$),需要引入解释变量包括分类变量和连续变量,对异质性的来源进行分析。

2.2 不同氮素类型对平均效应值的影响

不同氮素类型对平均效应值存在极显著性影响(自由度 $df = 4$, $P < 0.0001$)。五种氮素对效应值

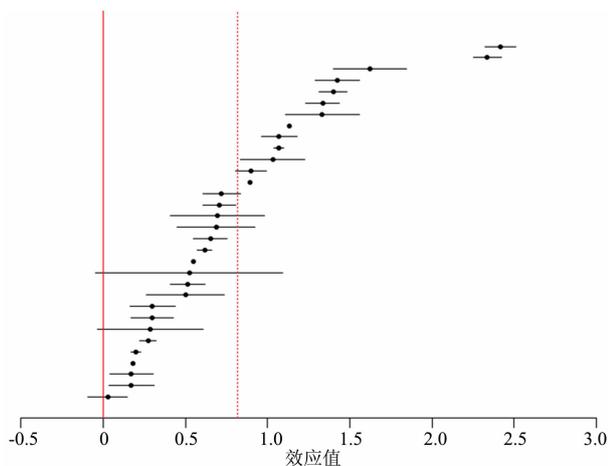


图1 氮沉降对我国北方草地氧化亚氮排放速率影响的效应值森林图

Fig.1 Effect size of nitrogen deposition on grasslands N_2O flux by forest plots

的影响顺序依次为硫酸铵、尿素、硝酸钠、硝酸铵、家畜尿液。硫酸铵的激发作用显著高于其他四种类型,而有机肥的激发效应最低,显著低于其他类型($P < 0.05$,表1)。不同氮素类型对平均效应值的残差异质性检验结果表明,平均效应值残差效应值为20 438.9,仍具有较强异质性(自由度 $df = 26$, $P < 0.0001$),需要引入其他连续变量作为相应的解释变量。

表1 北方草地对不同氮素类型氮沉降响应的平均效应值对比分析

Tab.1 Contrastive analysis different nitrogen types on cumulative effect value

氮肥类型	平均效应值	95% 置信区间
硫酸铵	$1.23 \pm 0.44a$	0.37 ~ 2.09
尿素	$1.07 \pm 0.62b$	-0.14 ~ 2.28
硝酸钠	$1.01 \pm 0.43b$	0.16 ~ 1.86
硝酸铵	$0.78 \pm 0.13c$	0.54 ~ 1.03
家畜尿液	$0.56 \pm 0.36d$	-0.14 ~ 1.27

注:同列中不同字母表示互相之间存在显著性差异($P < 0.05$)。

2.3 气候因子及土壤理化性质等连续变量对平均效应值的影响强度

氮素剂量、土壤有机碳、气温和海拔对我国北方草地生态系统响应氮沉降的平均效应值均具有显著性影响($P < 0.05$)。氮沉降的平均效应值与氮素剂量和气温之间存在极显著正相关关系,而与土壤有机碳和海拔间存在极其显著负相关关系(表2)。氮素剂量和土壤有机碳含量分别可以解释47.31%和45.27%的效应值变异。随着氮沉降量逐渐增加,草地退化引起土壤有机质降低,均会显著增加平均效应值,增加氮沉降的激发效应,加剧全球温室效应。

2.4 基于漏斗图的效应值对称性检验

Meta整合分析所采用的数据来源于已公开发表的学术论文及硕士和博士毕业论文,是对单一效应值与平均效应值的整合评价,该过程可能会受到论文作者引用发表论选择偏倚所影响。基于漏斗图的对称性检验,结果发现本研究的 P 值为0.7431,远大于显著性检验水平0.05($z = -0.3277$, $P = 0.7431$,图2)。因而,本研究所得出的结果并无因论文引用所带来的发表偏爱性,具备充足的可信性。

表 2 气候和土壤理化性质对平均效应值的影响

Tab. 2 Effect of soil physical and climate factors on cumulative effect sizes

解释变量 x	异质性检验 Q_m	P	拟合方程	效应值变异 $R^2/\%$	P
氮素剂量	28.17	<0.0001	$y = 0.53 + 0.03x$	47.31	<0.0001
有机碳	15.86	<0.0001	$y = 1.18 - 0.11x$	45.27	<0.0001
气温	6.65	<0.01	$y = 0.89 + 0.11x$	15.99	<0.0001
海拔	4.71	<0.05	$y = 1.16 - 0.0002x$	10.92	<0.0001
pH	2.69	0.10	$y = 3.38 - 0.34x$	7.93	<0.0001
降雨量	1.68	0.19	$y = 0.02 + 0.002x$	2.81	<0.0015
容重	0.24	0.62	$y = -0.28 + 1.09x$	0.01	0.17
全氮	0.19	0.66	$y = 0.85 + 0.06x$	0.01	0.19

注: y 是平均效应值, 表征氮沉降对我国北方草地氧化亚氮排放速率的影响效应。

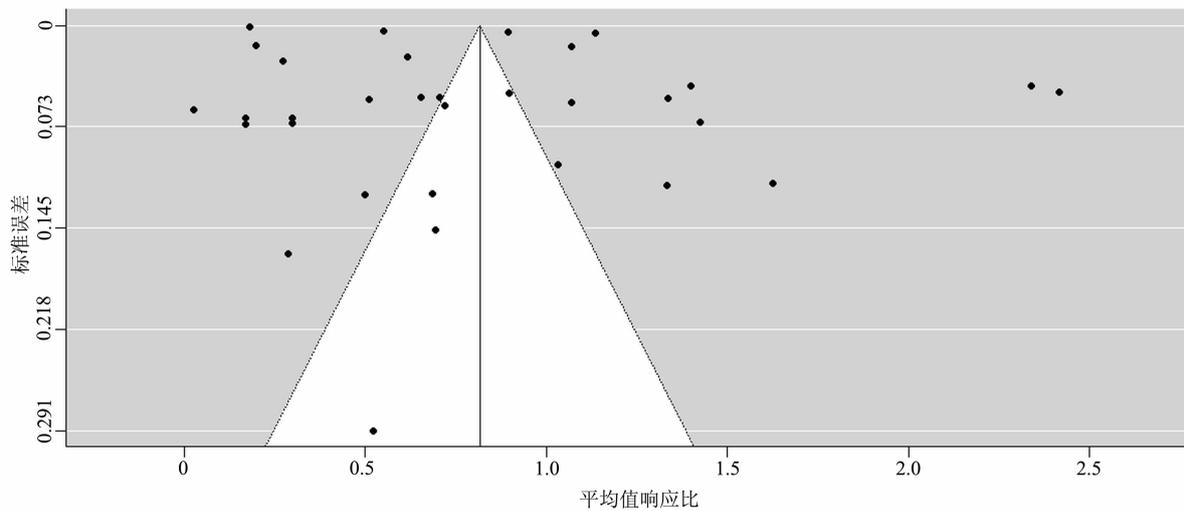
图 2 模拟氮沉降对北方草地 N_2O 排放影响的效应值对称性检验

Fig. 2 Funnel plot asymmetry on effects size by Egger's regression test in grasslands

3 讨论

大量气候观测数据证明, 陆地生态系统正在遭受全球气候变化影响^[5,12]。人类工业和农牧活动导致大气氮沉降数量明显增加, 我国境内大气氮沉降量已经成为继欧洲、北美之后的第三大氮素沉降区^[9,13]。土壤速效氮含量是草地土壤微生物硝化过程和反硝化过程的重要底物^[1,9]。

我国北方草地总面积约 3 亿 ha ^[14]。本次收集 32 组研究数据, 按草地类型分为温性草原^[2,15-17] (17 组)、高寒草原^[4,18-19] (7 组)、高寒草甸^[20-21] (6 组) 和草甸草原^[22] (2 组)。温性草原分别施用硝酸铵^[15-16]、硝酸钠^[2]、尿素^[17] 作为氮肥模拟氮沉降,

年施氮量范围依次为 1.0 ~ 64.0、25.0 ~ 50.0、2.5 ~ 5.0 $g \cdot N \cdot m^{-2}$ 。高寒草原采用硝酸铵^[4,18] 和尿素^[19] 及家畜尿液^[19] 模拟氮沉降处理, 年施氮量分别为 1.0 ~ 15.0、0.70 和 0.35 $g \cdot N \cdot m^{-2}$ 。高寒草甸均使用硝酸铵^[19,20] 模拟氮沉降处理, 年施氮量从 0.7 ~ 4.0 $g \cdot N \cdot m^{-2}$ 。草甸草原采用硫酸铵模拟氮沉降实验^[22], 年施氮量从 1.0 ~ 2.0 $g \cdot N \cdot m^{-2}$ 。本研究发现氮沉降对我国北方草地氧化亚氮排放影响存在较大的空间异质性, 增加幅度范围是 2.70% ~ 91.09%, 其中草甸草原、温性草原、高寒草甸和高寒草原生态系统 N_2O 排放速率平均增加幅度依次为 70.17%、58.07%、39.22% 和 29.55%。草甸草原增加幅度极显著高于高原草原 ($P < 0.01$)、显著高于高寒草甸 ($P < 0.05$)。草甸草原、

温性草原主要分布在内蒙古地区,而高寒草甸和高寒草原主要分布在青藏高原地区,前两者的增加幅度明显高于后两者,这可能是因为内蒙草地土壤速效氮素含量相对较低,对氮沉降响应更为敏感,高寒草甸和高寒草原土壤速效养分和有机质含量相对丰富且受低温限制,对氮沉降不敏感,因此其增加幅度低于内蒙古草原^[17,20-22]。氮沉降对英国高山草地和温性草原 N₂O 排放速率的影响分别为 67.57% 和 1.16%,同样呈现较强异质性^[23,24]。氮沉降平均效应值为 0.82,显著增加我国草地生态系统 N₂O 排放速率,并且随着氮沉降剂量逐渐增加,草地生态系统 N₂O 排放速率可能会极显著提高,这需要引起广泛地关注。

本研究揭示硫酸铵、硝酸钠、尿素和硝酸铵对北方草地 N₂O 排放速率增加幅度依次为 70.17%^[22]、63.48%^[2]、48.77%^[17,19] 和 46.14%^[4,15-16,18,20-21];各处理间未达到显著性差异。为了补充天然草地氮素损失同时减少大气温室气体 N₂O 排放量,可以优先考虑施用硝酸铵。硝酸铵对温性草原、高寒草甸和高寒草原生态系统 N₂O 排放速率增加幅度分别为 59.30%^[15,16]、39.22%^[20,21] 和 20.21%^[4,18]。

草地土壤有机质是植物营养元素的主要来源^[14,25],改善土壤的物理性质,促进微生物和土壤生物的活动,提高土壤的保肥性和缓冲性的作用,提升草地生产功能,氮沉降降低草地土壤碳氮比,改变土壤微生物类群及多样性特征,影响草地生态系统 N₂O 排放过程^[2]。本研究发现土壤有机质可以极显著地影响氮沉降的平均效应值,这可能是因为土壤有机碳可以有效缓冲氮沉降对碳氮比的影响^[4]。随着社会发展、人口不断增加,加剧了对畜产品的需求,造成大部分草地超载放牧,世界草地 60% 以上出现退化,我国温带草原接近 90% 处于退化状态^[14,25]。中度以上退化草地土壤有机碳含量显著低于轻度或未退化草地^[26-28]。随着氮沉降含量增加,青藏高原高寒草甸土壤有机碳含量显著增加^[28],中度和重度放牧相助降低高寒草地土壤有机碳含量,但显著增加土壤 N₂O 排放速率增加幅度分别为 20.4% 和 9.3%^[26]。随着土壤有机碳含量降低,欧洲和北美地区草地和湿地生态系统 N₂O 排放速率显著增加^[29],通过降低放牧强度、围栏封育及人工草地种植等草地适应性管理措施,将会明显提

高草地土壤有机碳含量和碳储量^[30-34],进而降低氮沉降对我国草地生态系统 N₂O 排放的激发效应。已有研究发现 pH 直接影响草地土壤微生物活性与碳氮营养元素形态,氮沉降引起天山高寒草地土壤 pH 降低 5.87%,而 N₂O 排放速率增加近 1 倍^[4]。青藏高原高寒草甸土壤 pH 分别为 7.3 和 6.4 时,高寒草甸土壤 N₂O 排放速率增加 30.96%^[35]。本研究发现平均效应值与 pH 之间存在显著负相关关系,表征延缓土壤 pH 降低,将会有效控制草地生态系统 N₂O 排放速率。

4 结论

本文基于数据整合分析揭示了氮沉降及不同氮素类型对我国北方草地温室气体 N₂O 排放速率的影响,并采用混合效应模型探索氮素剂量和有机碳含量等因素对平均效应值的影响,主要结论如下:

(1) 氮沉降显著增加中国草地生态系统 N₂O 平均排放速率 ($P < 0.001$), 平均效应值为 0.82 ± 0.11 (95% 置信区间 0.61 ~ 1.02)。效应值异质性检验 Q_i 值为 64653.16 ($P < 0.0001$), 需要引入解释变量,进一步解析异质性的来源。

(2) 不同氮素类型对 N₂O 排放速率的平均效应值影响存在极显著差异,草地施肥优先考虑硝酸铵。氮沉降对不同类型草地 N₂O 排放速率增加强度呈现较强空间异质性,从高到低依次为:草甸草原、温性草原、高寒草甸和高寒草原。草甸草原增加幅度极显著高于高原草原 ($P < 0.01$)、显著高于高寒草甸 ($P < 0.05$)。未来应注重内蒙古草原对氮沉降敏感性较高的响应特征。

(3) 氮素剂量和土壤有机碳含量是影响平均效应值的主要因素,分别可以解释 47.31% 和 45.27% 的效应值变异。随着氮沉降剂量逐渐增加,以及受草地退化所引起的土壤有机碳降低,均会显著增加平均效应值,增加氮沉降对 N₂O 排放速率的激发效应,加剧全球温室效应。提高土壤有机碳含量、减缓土壤酸化现象均可以有效降低氮沉降对中国草地生态系统 N₂O 排放速率的激发效应。

参考文献 (References)

- [1] TANG S M, WANG K, XIANG Y Z, et al. Heavy grazing reduces grassland soil greenhouse gas fluxes: A global meta-analysis [J].

- Science of the Total Environment, 2019, **654**: 1218 – 1224. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.082
- [2] 杨涵越,张婷,黄永梅,等. 模拟氮沉降对内蒙古克氏针茅草原 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1900 – 1907. [YANG Hanyue, ZHANG Ting, HUANG Yongmei, et al. Effects of stimulated N deposition on N₂O emission from a stipa krylovii steppe in Inner Mongolia, China [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1900 – 1907] DOI: 10.13227/j.hjxk.2016.05.038
- [3] VET R, ARTZ R S, CAROU S, et al. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus [J]. Atmospheric Environment, 2014, **93**: 3 – 100. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.10.060
- [4] GENG F Z, LI K H, LIU X J, et al. Long-term effects of N deposition on N₂O emission in an alpine grassland of Central Asia [J]. Catena, 2019, **182**: 104100. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104100
- [5] BURDA B U, O'CONNOR E A, WEBBER E M, et al. Estimating data from figures with a Web-based program: Considerations for a systematic review [J]. Research Synthesis Methods, 2017, **8**(3): 258 – 262. DOI: 10.1002/jrsm.1232
- [6] World Meteorological Organization, Statement of the global climate 2020 [R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2020: 163.
- [7] IPCC. Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2014:8.
- [8] 侯向阳. 可持续挖掘草原生产潜力的途径、技术及政策建议 [J]. 中国农业科学, 2016, **49**(16): 3229 – 3238. [HOU Xiangyang. Priority approaches, techniques and models to sustainably tap the grassland productivity potential [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, **49**(16): 3229 – 3238] DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2016.16.016
- [9] 杜岩功,曹莹芳,周庚,等. 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[J]. 中国草地学报, 2017, **39**(5): 116 – 120. [DU Yangong, CAO Yingfang, ZHOU Geng, et al. Effect of stimulated nitrogen deposition and adding precipitation and its interaction on soil N₂O emissions in alpine meadow [J]. Chinese Journal of Grassland, 2017, **39**(5): 116 – 120] DOI: 10.16742/j.zgdx.2017-05-17
- [10] 周庚, 杜岩功. Meta 分析氮肥对我国秋季大白菜产量的影响及调控因素解析[J]. 安徽农业科学, 2020, **48**(20): 160 – 162. [ZHOU Geng, DU Yangong. Meta-analysis of the effect size of nitrogen fertilization on the yield of Chinese Cabbage in Autumn and its regulatory factors [J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2020, **48**(20): 160 – 162] DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.20.043
- [11] 许庆民,王云英,辛莹,等. Meta 分析放牧对中国北方草地生态系统蒸散量的影响[J]. 草业科学, 2020, **37**(10): 1952 – 1958. [XU Qingmin, WANG Yunying, XIN Ying, et al. Meta-analysis of the effect of grazing on grassland evapotranspiration in China [J]. Pratacultural Science, 2020, **37**(10): 1952 – 1958] DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0162
- [12] AKIYAMA H, YAN X Y, YAGI K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2010, **16**(6): 1837 – 1846. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02031.x
- [13] LIU X J, ZHANG Y, HAN W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China [J]. Nature, 2013, **494**(7438): 459 – 462. DOI: 10.1038/nature11917
- [14] 白永飞,赵玉金,王扬,等. 中国北方草地生态系统服务评估和功能区划助力生态安全屏障建设[J]. 中国科学院院刊, 2020, **35**(6): 675 – 689. [BAI Yongfei, ZHAO Yujin, WANG Yang, et al. Assessment of ecosystem services and ecological regionalization of grasslands support establishment of ecological security barriers in Northern China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, **35**(6): 675 – 689] DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20200515003
- [15] LIU X C, DONG Y S, QI Y C, et al. Response of N₂O emission to water and nitrogen addition in temperate typical steppe soil in Inner Mongolia, China [J]. Soil and Tillage Research, 2015, **151**: 9 – 17. DOI: 10.1016/j.still.2015.01.008
- [16] GU X Y, WANG Y H, LAANBROEK H J, et al. Saturated N₂O emission rates occur above the nitrogen deposition level predicted for the semi-arid grasslands of Inner Mongolia, China [J]. Geoderma, 2019, **341**: 18 – 25. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.01.002
- [17] CHEN W W, ZHENG X H, CHEN Q, et al. Effects of increasing precipitation and nitrogen deposition on CH₄ and N₂O fluxes and ecosystem respiration in a degraded steppe in Inner Mongolia, China [J]. Geoderma, 2013, **192**: 335 – 340. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.08.018
- [18] LI K H, GONG Y M, SONG W, et al. Responses of CH₄, CO₂ and N₂O fluxes to increasing nitrogen deposition in alpine grassland of the Tianshan Mountains [J]. Chemosphere, 2012, **88**(1): 140 – 143. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.02.077
- [19] CAI Y J, DU Z Y, YAN Y, et al. Greater stimulation of greenhouse gas emissions by stored yak urine than urea in an alpine steppe soil from the Qinghai – Tibetan Plateau: A laboratory study [J]. Grassland Science, 2017, **63**(3): 196 – 207. DOI: 10.1111/grs.12164
- [20] DU Y G, GUO X W, CAO G M, et al. Increased nitrous oxide emissions resulting from nitrogen addition and increased precipitation in an alpine meadow ecosystem [J]. Polish Journal of Environment Studies, 2016, **25**(1): 447 – 451. DOI: 10.15244/

- pjoes/60860
- [21] YAN Y L, GANJURJAV H, HU G Z, et al. Nitrogen deposition induced significant increase of N₂O emissions in a dry alpine meadow on the central Qinghai - Tibetan Plateau [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, **265**: 45 - 53. DOI: 10.1016/j.agee. 2018.05.031
- [22] LIU X R, ZHANG Q W, LI S G, et al. Simulated NH₄⁺-N deposition inhibits CH₄ uptake and promotes N₂O emission in the meadow steppe of Inner Mongolia, China [J]. *Pedosphere*, 2017, **27**(2): 306 - 317. DOI: 10.1016/S1002 - 0160(17)60318 - 7
- [23] MARSDEN K A, HOLMBERG J A, JONES D L, et al. Sheep urine patch N₂O emissions are lower from extensively-managed than intensively-managed grasslands [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, **265**: 264 - 274. DOI: 10.1016/j.agee. 2018.06.025
- [24] WANG J Y, HAYES F, CHADWICK D R, et al. Short-term responses of greenhouse gas emissions and ecosystem carbon fluxes to elevated ozone and N fertilization in a temperate grassland [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **211**: 204 - 213. DOI: 10.1016/j.atmosenv. 2019.05.027
- [25] 王德利, 王岭. 草地管理概念的新释义[J]. *科学通报*, 2019, **64**(11): 1106 - 1113. [WANG Deli, WANG Ling. A new perspective on the concept of grassland management [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, **64**(11): 1106 - 1113] DOI: 10.1360/N972018 - 01036
- [26] DU Y G, SHU K, GUO X W, et al. Moderate grazing promotes grassland nitrous oxide emission by increasing ammonia-oxidizing archaea abundance on the Tibetan Plateau [J]. *Current Microbiology*, 2019, **76**(5): 620 - 625. DOI: 10.1007/s00284 - 019 - 01668 - x
- [27] CHEN L T, JING X, FLYNN D F B, et al. Changes of carbon stocks in alpine grassland soils from 2002 to 2011 on the Tibetan Plateau and their climatic causes [J]. *Geoderma*, 2017, **288**: 166 - 174. DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.11.016
- [28] LI L J, ZHU-BARKER X, YE R Z, et al. Soil microbial biomass size and soil carbon influence the priming effect from carbon inputs depending on nitrogen availability [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **119**: 41 - 49. DOI: 10.1016/j.soilbio. 2018.01.003
- [29] LIU H, ZAK D, REZANEZHAD F, et al. Soil degradation determines release of nitrous oxide and dissolved organic carbon from peatlands [J]. *Environmental Research Letters*, 2019, **14**(9): 094009. DOI: 10.1088/1748 - 9326/ab3947
- [30] 杨阳, 贾丽欣, 乔芙蓉, 等. 短期刈割对大针茅草地群落特征和植物多样性的影响[J]. *中国草地学报*, 2019, **41**(3): 37 - 43 [YANG Yang, JIA Lixin, QIAO Jirong, et al. Effect of mowing patterns on community characteristics and plant diversity in stipa grandis steppe [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, **41**(3): 37 - 43] DOI: 10.16742/j.zgcdxb.20180173
- [31] BOSSIO D A, COOK-PATTON S C, ELLIS P W, et al. The role of soil carbon in natural climate solutions [J]. *Nature Sustainability*, 2020, **3**: 391 - 398. DOI: 10.1038/s41893 - 020 - 0491 - z
- [32] LIU S L, ZHANG F W, DU Y G, et al. Ecosystem carbon storage in alpine grassland on the Qinghai Plateau [J]. *Plos One*, 2016, **11**(8): e0160420. DOI: 10.1371/journal.pone.0160420
- [33] DU Y G, KE X, GUO X W, et al. Soil and plant community characteristics under long-term continuous grazing of different intensities in an alpine meadow on the Tibetan Plateau [J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2019, **85**: 72 - 75. DOI: 10.1016/j.bse.2019.05.012
- [34] ULLAH M R, DIJKSTRA F A. Fungicide and bactericide effects on carbon and nitrogen cycling in soils: A Meta-analysis [J]. *Soil Systems*, 2019, **3**: 23. DOI: 10.3390/soilsystems3020023
- [35] DU Y G, CUI Y G, XU X L, et al. Nitrous oxide emissions from two alpine meadows in the Qinghai - Tibetan Plateau [J]. *Plant Soil*, 2008, **311**(2): 245 - 254. DOI: 10.1007/s11104 - 008 - 9727 - 9

Effect of Nitrogen Deposition on Grasslands Nitrous Oxide Emission Rates by Meta-Analysis Method

WANG Xia¹, DU Yangong^{2*}, GUO Xiaowei²

(1. *Laiwu Vocational and Technical College, garden engineering division, Laiwu 271100, Shandong, China;*

2. *Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Science, Xining 810008, China)*

Abstract: The increase of greenhouse gas concentrations has become a critical situation in global warming. Nitrous oxide (N₂O) is one of the three primary greenhouse gases. Nitrogen deposition changes the characteristics of soil

microbial communities and affects the N₂O emission rate. Northern grassland plays a vital role in ecological security barriers and animal husbandry in China. However, the effect of nitrogen deposition on N₂O emission rates and its regulatory factors are still unclear. In this study, 32 grasslands' experimental results were analyzed using Meta-analysis method. The results indicate that the average effect size was approximately 0.82 ± 0.11 (95% confidence interval 0.61 ~ 1.0) for simulated nitrogen deposition on N₂O emission rates ($P < 0.001$). Different nitrogen types significantly affected the average effect size, with a high-to-low order high of ammonium sulfate, urea, sodium nitrate, ammonium nitrate, and livestock urine. Nitrogen dosage, soil organic carbon, air temperature, and altitude had significant effects on the average effect size. Furthermore, the effect size variation of 47.31% and 45.27% could be explained by nitrogen dosage and soil organic matter content, respectively. There was a significant positive correlation between effect size, nitrogen dosage, and air temperature. Furthermore, a significant negative correlation was revealed between the average effect size, soil organic carbon, and altitude. In addition, the grasslands nitrogen deposition effect on N₂O emission may be significantly reduced by increasing soil organic carbon content through grassland adaptive management measures.

Key words: nitrogen deposition; Meta-analysis; grasslands ecosystem; random effect model; effect size