

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

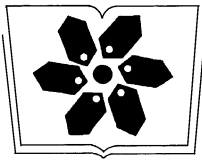
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第13期 Vol.33 No.13 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 13 期 2013 年 7 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 强度干扰后退化森林生态系统中保留木的生态效应研究综述..... 缪 宁,刘世荣,史作民,等 (3889)
- AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理..... 罗巧玉,王晓娟,林双双,等 (3898)

个体与基础生态

- 东灵山不同林型五角枫叶性状异速生长关系随发育阶段的变化..... 姚 婧,李 颖,魏丽萍,等 (3907)
- 不同温度下 CO₂ 浓度增高对坛紫菜生长和叶绿素荧光特性的影响..... 刘 露,丁柳丽,陈伟洲,等 (3916)
- 基于 LULUCF 温室气体清单编制的浙江省杉木林生物量换算因子..... 朱汤军,沈楚楚,季碧勇,等 (3925)
- 土壤逐渐干旱对菖蒲生长及光合荧光特性的影响..... 王文林,万寅婧,刘 波,等 (3933)
- 一株柠条内生解磷菌的分离鉴定及实时荧光定量 PCR 检测..... 张丽珍,冯利利,蒙秋霞,等 (3941)
- 一个年龄序列巨桉人工林植物和土壤生物多样性..... 张丹桔,张 健,杨万勤,等 (3947)
- 不同饵料和饥饿对魁蚶幼虫生长和存活的影响..... 王庆志,张 明,付成东,等 (3963)
- 禽畜养殖粪便中多重抗生素抗性细菌研究..... 祁诗月,任四伟,李雪玲,等 (3970)
- 链状亚历山大藻赤潮衰亡的生理调控..... 马金华,孟 希,张 淑,等 (3978)
- 基于环境流体动力学模型的浅水草藻型湖泊水质数值模拟..... 李 兴,史洪森,张树礼,等 (3987)

种群、群落和生态系统

- 干旱半干旱地区围栏封育对甘草群落特征及其分布格局的影响..... 李学斌,陈 林,李国旗,等 (3995)
- 宁夏六盘山三种针叶林初级净生产力年际变化及其气象因子响应..... 王云霓,熊 伟,王彦辉,等 (4002)
- 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征..... 莫保儒,蔡国军,杨 磊,等 (4011)
- 模拟酸沉降对鼎湖山季风常绿阔叶林地表径流水化学特征的影响..... 丘清燕,陈小梅,梁国华,等 (4021)
- 基于改进 PSO 的洞庭湖水源涵养林空间优化模型..... 李建军,张会儒,刘 帅,等 (4031)
- 外来植物火炬树水浸液对土壤微生物生态系统的化感作用..... 侯玉平,柳 林,王 信,等 (4041)
- 崇明东滩抛荒鱼塘的自然演替过程对水鸟群落的影响..... 杨晓婷,牛俊英,罗祖奎,等 (4050)
- 三峡水库蓄水初期鱼体汞含量及其水生食物链累积特征..... 余 杨,王雨春,周怀东,等 (4059)
- 元江鲤种群遗传多样性..... 岳兴建,邹远超,王永明,等 (4068)

景观、区域和全球生态

- 中国西北干旱区气温时空变化特征..... 黄 蕊,徐利岗,刘俊民 (4078)
- 集水区尺度下东北东部森林土壤呼吸的模拟..... 郭丽娟,国庆喜 (4090)
- 增氮对青藏高原东缘高寒草甸土壤甲烷吸收的早期影响..... 张裴雷,方华军,程淑兰,等 (4101)
- 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析..... 张 义,张合平 (4111)
- 深圳市景观生态安全格局源地综合识别..... 吴健生,张理卿,彭 建,等 (4125)

庐山风景区碳源、碳汇的测度及均衡..... 周年兴,黄震方,梁艳艳 (4134)

气候变化对内蒙古中部草原优势牧草生长季的影响 李夏子,韩国栋,郭春燕 (4146)

民勤荒漠区典型草本植物马蔺的物候特征及其对气候变化的响应..... 韩福贵,徐先英,王理德,等 (4156)

血水草生物量及碳贮量分布格局..... 田大伦,闫文德,梁小翠,等 (4165)

5 种温带森林生态系统细根的时间动态及其影响因子 李向飞,王传宽,全先奎 (4172)

资源与产业生态

干旱胁迫下 AM 真菌对矿区土壤改良与玉米生长的影响..... 李少朋,毕银丽,陈咄圳,等 (4181)

城乡与社会生态

上海环城林带保健功能评价及其机制..... 张凯旋,张建华 (4189)

研究简报

北京山区侧柏林林内降雨的时滞效应 史 宇,余新晓,张佳音 (4199)

采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应
..... 胡振宏,何宗明,范少辉,等 (4205)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2013-07



封面图说: 岳阳附近的水源涵养林及水系鸟瞰——水源涵养林对于调节径流,减缓水、旱灾害,合理开发利用水资源具有重要的生态意义。洞庭湖为我国第二大淡水湖,南纳湘、资、沅、澧四水,北由岳阳城陵矶注入长江,是长江上最重要的水量调节湖泊。因此,湖周的水源涵养林建设对于恢复洞庭湖调节长江中游地区洪水的功能,加强湖区生物多样性的保护是最为重要的举措之一。对现有防护林采取人为干扰的调控措施,改善林分空间结构,将有利于促进森林生态系统的正向演替,为最大程度恢复洞庭湖水源林生态功能和健康经营提供重要支撑。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201208281217

张裴雷, 方华军, 程淑兰, 徐敏杰, 李林森, 党旭升. 增氮对青藏高原东缘高寒草甸土壤甲烷吸收的早期影响. 生态学报, 2013, 33(13): 4101-4110.
Zhang P L, Fang H J, Cheng S L, Xu M J, Li L S, Dang X S. The Early effects of nitrogen addition on CH₄ uptake in an alpine meadow soil on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4101-4110.

增氮对青藏高原东缘高寒草甸 土壤甲烷吸收的早期影响

张裴雷¹, 方华军², 程淑兰^{1,*}, 徐敏杰¹, 李林森¹, 党旭升²

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 研究大气氮沉降对青藏高原高寒草甸土壤 CH₄ 吸收的影响, 对于揭示氮素调节土壤 CH₄ 吸收的机制和评价氮沉降增加背景下大气 CH₄ 收支平衡至关重要。通过构建多形态、低剂量的增氮控制试验, 测定土壤 CH₄ 净交换通量和相关土壤理化性质, 分析高寒草甸土壤 CH₄ 通量变化特征及其主要驱动因子。研究表明: 自然状态下高寒草甸土壤是大气 CH₄ 汇, CH₄ 平均吸收量为 $(35.40 \pm 1.92) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。土壤 CH₄ 吸收主要受水分驱动, 其次为土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量。NH₄⁺-N 抑制 CH₄ 吸收, NO₃⁻-N 促进 CH₄ 吸收; 不同剂量氮素输入对土壤 CH₄ 吸收影响也不尽相同, 低氮处理促进土壤 CH₄ 吸收, 而中氮和高氮处理抑制土壤 CH₄ 吸收。结果显示青藏高原高寒草甸土壤是重要的大气 CH₄ 汇, 在未来大气氮沉降加倍的情景下 CH₄ 汇功能增强, 但当氮沉降量增加两倍以上时 CH₄ 汇功能将会减弱。

关键词: 大气氮沉降; CH₄ 吸收; 土壤氮素; 驱动因子; 高寒草甸

The early effects of nitrogen addition on CH₄ uptake in an alpine meadow soil on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau

ZHANG Peilei¹, FANG Huajun², CHENG Shulan^{1,*}, XU Minjie¹, LI Linsen¹, DANG Xusheng²

¹ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

² Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The increase in atmospheric nitrogen (N) deposition caused by human activities significantly changes carbon cycling and the carbon budget in terrestrial ecosystems. Unsaturated soil is a unique biological methane (CH₄) sink, accounting for about 5% of all atmospheric CH₄ absorption. Alpine meadow is a typical N-limited ecosystem in which the soil microorganisms and plants have adapted to the N poor environment so that long-term slow N input will change the carbon cycle process, structure and function of this fragile ecosystem. Therefore, it is crucial and helpful to explore the mechanisms responsible for the responses of soil CH₄ uptake to exogenous N input. In 2007, a multi-form, low-level N addition experiment was conducted at the Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station on the Qinghai-Tibetan Plateau. Three N fertilizers; NH₄Cl, (NH₄)₂SO₄, and KNO₃ were added at four rates; control (0 kgN·hm⁻²·a⁻¹), low N (10 kgN·hm⁻²·a⁻¹), medium N (20 kgN·hm⁻²·a⁻¹), and high N (40 kgN·hm⁻²·a⁻¹). Each N treatment contained three replicates, making a total of 36 plots. During the growing season (May to October), soil CH₄ fluxes were monitored weekly by the static chamber-gas chromatograph technique. Simultaneously to the soil CH₄ flux measurements, soil temperature and

基金项目: 国家自然科学基金(31070435, 41071166, 31130009); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(Y225017EA2); 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB833502, 2010CB833501), 中国科学院地理科学与资源研究所“秉维”优秀青年人才基金(2011RC202); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050600)资助

收稿日期: 2012-08-28; 修订日期: 2013-03-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: slcheng@ucas.ac.cn

soil moisture were also recorded at 10 cm depth. In addition, the soil ammonium, nitrate and dissolved organic carbon contents as well as the pH were measured monthly to examine the key driving factors of soil CH₄ uptake. The results showed that: (1) N addition significantly changed the soil moisture content. Both low and high levels of N addition tended to consume soil moisture, whereas a medium level of N input was favorable to maintaining soil moisture, which mainly depended on the soil moisture balance of precipitation, soil evaporation and plant transpiration. (2) N addition significantly changed soil NH₄⁺-N, but did not affect the soil NO₃⁻-N pool. As the most vulnerable part of the ecosystem to a change in N forms, plants preferentially absorbed NO₃⁻-N rather than NH₄⁺-N and added NO₃⁻-N was absorbed more strongly by plants than NH₄⁺-N. Therefore, accumulation of soil NH₄⁺-N caused by N addition was more significant than that of soil NO₃⁻-N. Nitrogen addition did not significantly decrease the soil pH values. (3) Soil-dissolved organic carbon strongly fluctuated within the growing season. After accumulating over the non-growing season, dissolved organic carbon content was at a maximum in May, and then continued to decrease until October because of microbial consumption. (4) Soil CH₄ uptake was mainly driven by soil moisture, followed by soil NH₄⁺-N and NO₃⁻-N contents. Ammonium fertilizer addition inhibited soil CH₄ uptake, whereas nitrate fertilizer promoted it. This research suggests that alpine meadow soils are an atmospheric CH₄ sink and that N addition can significantly affect CH₄ uptake in the short term. Low N addition can promote CH₄ uptake from alpine meadow soil, while medium and high N deposition inhibits CH₄ uptake and decreases the atmospheric CH₄ sink. The critical level of atmospheric N deposition is about 20 kgN/hm² · a if the ambient N deposition rate is considered.

Key Words: atmospheric nitrogen deposition; Methane flux; Soil nitrogen; Controlling factors; Alpine meadow

CH₄ 在大气中的含量仅为 1.774 μL/L, 存留时间约 10a。然而由于 CH₄ 对长波辐射的吸收潜能是同等 CO₂ 的 20—30 倍, 使得 CH₄ 成为继 CO₂ 之后的第二大温室气体, 对全球变暖的贡献率占 18% 左右^[1]。大气中 CH₄ 含量的变化取决于 CH₄ 源和汇的平衡。水分非饱和土壤是唯一的大气 CH₄ 生物汇, 占全球大气 CH₄ 汇的 5% 左右。如果缺少这个汇将会使大气 CH₄ 的含量以目前速度的 1.5 倍上升^[2]。

氮素是影响 CH₄ 生物汇的重要因素之一。由于人类活动加剧了活性氮排放, 2005 年全球大气氮沉降量已达 105 Tg/a, 并呈逐年增加趋势, 预计未来 25a 内全球大气氮沉降可能加倍^[3-4]。外源性氮输入显著影响陆地生态系统土壤 CH₄ 的排放和吸收过程。例如, 1989 年 Steudler 等^[5]首次研究了氮输入对土壤 CH₄ 氧化吸收的影响, 发现施加 NH₄NO₃ 后, 土壤 CH₄ 氧化速率降低了 33%。随后一系列研究进一步证实了 Steudler 等的研究结果。Xu 等^[6]研究发现施加 45 kgN·hm⁻²·a⁻¹ 的 (NH₄)₂SO₄ 和 NH₄Cl 分别使土壤 CH₄ 氧化速率降低了 5% 和 20%。此外, 有关氮素输入对土壤 CH₄ 氧化吸收的影响除抑制效应外还有促进和不显著两种结果。Borken 等^[7]的增氮控制实验结果表明氮素添加对土壤 CH₄ 氧化吸收影响并不显著; 而 Bodelier 等^[8-9]研究发现外源氮输入反而提高了土壤 CH₄ 氧化能力。由此可见, 土壤 CH₄ 氧化能力对氮沉降的响应并非一成不变, 其内在的响应机理也非常复杂。Bodelier 等^[10]详细概述了有关氮素调节土壤 CH₄ 氧化的内在机理, 包括 NH₃ 同 CH₄ 竞争结合 CH₄ 单加氧酶 (MMO)、中间代谢产物的毒害作用和氮素周转机制等 3 个方面。

国内有关氮素对土壤 CH₄ 吸收的影响研究多集中在森林生态系统, 对草地生态系统尤其高寒草甸生态系统的关注较少。我国青藏高原高寒草甸面积巨大, 生态环境脆弱, 各种环境因子常处于临界阈值状态, 对环境变化极其敏感^[11]。目前青藏高原大气氮沉降已十分明显, 变化范围为 8.7—13.8 kgN·hm⁻²·a⁻¹, 并呈逐年增加的趋势^[12]。但是, 目前关于高寒草甸氮沉降对碳截留的影响研究尚未系统地展开, Jiang 等^[13]研究发现青藏高原高寒草甸是大气 CH₄ 的吸收汇, 施氮第 1 年对青藏高原高寒草甸土壤 CH₄ 吸收无显著影响, 有关土壤 CH₄ 吸收的氮素调控机理依然不清楚。并且, 过去的大气氮沉降控制实验研究中施氮剂量普遍偏高, 施氮频率较低, 难以准确反映真实的大气氮沉降状况。基于上述考虑, 本研究以青藏高原高寒草甸生态系统为研究对象, 构建低剂量、高频率增氮控制实验, 连续监测土壤-大气界面 CH₄ 通量, 分析施氮剂量和施氮形态对

土壤 CH_4 吸收的影响;同时采集土壤样品测定土壤无机氮、溶解性碳含量和 pH 等相关土壤属性,探讨土壤 CH_4 吸收的主控因子。研究结果有助于阐明高寒草甸土壤 CH_4 吸收对大气氮沉降的响应机理,并可为未来大气氮沉降增加情景下青藏高原高寒草甸生态系统碳、氮管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站,地处青藏高原边缘东北部风匣口(北纬 $37^{\circ}37'$, 东经 $101^{\circ}19'$)。气候类型属大陆高原性气候,年均气温 -0.17°C ,冬季(10月—翌年4月)漫长寒冷,暖季(5—9月)短暂凉爽。降水 80% 集中在 5—10 月份,年降水量 580mm。植被类型为矮嵩草草甸,植被建群种为矮嵩草(*Kobresia humilis*),主要优势种为垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、异针茅(*Stipa aliena*)、麻花艽(*Gentiana straminea*)、甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)和紫羊茅(*Festuca rubra*)等。土壤为草毡寒冻雏形土,发育年轻,土层浅薄,呈微碱性,土壤有机质含量较高^[14]。

1.2 试验设计

参照海北站实际大气氮沉降量($8.7\text{—}13.8\text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[15],以及大气沉降氮的两种形态(氧化态 NO_3^- 和还原态 NH_4^+),于 2007 年 5 月设置了低氮(Low N, $10\text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、中氮(Medium N, $20\text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、高氮(High N, $40\text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)3 种水平和 NH_4Cl 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 KNO_3 3 种类型的施氮控制实验。每个处理下设置一个对照(Control)以消除环境异质性影响。每个处理设置 3 次重复,共 36 个样方,样方大小为 $3\text{m}\times 3\text{m}$,各个样方之间设置 2m 缓冲带。每年生长季(5—10 月份)月初将氮肥溶于 10L 水中,均匀喷洒于样方内,生长季内每个样方每月施氮量为该样方年施氮量的 $1/12$ 。对照样方喷洒等量的水以消除增水效应。每年 10 月初将非生长季(11 月—翌年 4 月)的氮肥(样方年施氮量的 $1/2$)一次性施入土壤中。所有样方位于冬季牧场,生长季不放牧。

1.3 土壤 CH_4 通量监测

在 2010 年生长季(5—10 月),采用静态暗箱-气相色谱法测定土壤 CH_4 净交换通量。静态箱由不锈钢材料制成,盖箱长、宽、高分别为 50 cm、50 cm 和 40 cm,10 cm 高的底座埋入地下,采样时注水密封。盖箱外部覆盖白色绝缘泡沫以减少取样时太阳辐射对箱内温度的影响,并在内部安装直径为 15cm 的风扇以确保箱内气体均匀混合。采样频率为每周一次,采样时间为 9:00—11:00,扣上盖箱后,在 30 min 时段内,每隔 10 min 用 100mL 注射器抽取箱内气体。24h 内利用气相色谱仪(Agilent6820A, USA)及色谱积分软件(Cerity QA-QC)测定并计算出气体的 CH_4 浓度。 CH_4 用火焰离子化检测器(FID)检测,分离采用 2m 长,2mm 内径的 13X 分子筛色谱柱,柱箱温度为 55°C ,检测器工作温度为 200°C 。载气为高纯氮气,流量为 $30\text{mL}/\text{min}$,标准气体为 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 混合气体。根据公式(1)计算土壤 CH_4 净交换通量^[16]:

$$F = \frac{16.121}{22.41} \cdot h \cdot \frac{P}{101.33} \cdot \frac{273.15}{T} \cdot \frac{dC_t}{dt} \cdot \frac{60}{100} \quad (1)$$

式中, F 为 CH_4 气体通量($\text{mgCH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$); h 是采样箱高度(cm); P 为观测点的大气压(kPa); T 为箱内气温($^{\circ}\text{F}$); dC_t/dt 为箱内 CH_4 浓度随时间变化的回归曲线斜率。

1.4 土壤理化性质的测定

在测定土壤 CH_4 通量同时,分别利用电子温度计(JM624)和土壤水分仪(TDR200)测定 0—10cm 深度的土壤温度和体积含水量。考虑到土壤含水量的空间异质性,每个样方测定 10 次取平均值来表示某一观测时刻的土壤水分含量。

生长季土壤采样为每月 1 次。在每个样方内,用土钻以 10cm 间隔进行土壤取样,采样深度为 30cm,同一样方每 5 钻同层土壤混合成一个样品,过 2mm 土壤筛后带回实验室冷冻。称取 15g 左右鲜土放入 150mL 的塑料瓶中,加入 100mL 0.2mol/L 的 KCl 溶液,在回旋式振荡器上振荡 1h 后用定量滤纸过滤,滤液用流动化学分析仪(SEAL AA3, Germany)测定土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。另称取 15g 左右鲜土放入 150mL 的塑料瓶

中,加入 100mL 去离子水,在回旋式振荡器上振荡 1h 后用离心机(4000 r/min)离心 30min,再用 0.45 μ m 微孔滤膜抽滤,滤液用总有机碳分析仪(Elementa, Germany)测定溶解性有机碳(DOC)含量。用百分之一天平准确称取 10g 风干土放入烧杯中,加入 25mL 去离子,搅拌均匀,静置 30min。用 pH 计(Mettler Toledo, Switzerland)测定上清液的 pH 值。

1.5 统计分析

以 3 层(0—10cm、10—20cm 和 20—30cm)土壤样品 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、DOC 和 pH 的平均值作为 0—30cm 对应变量的原始数据。运用重复测量方差分析比较各月份不同施氮水平和施氮类型下土壤 CH_4 吸收量以及其它土壤理化属性的差异。为了消除环境异质性对实验处理的可能影响,研究数据采用响应比(处理组变量与对照组变量的比值)进行分析,其中对照组的响应比为 1。另外,运用多元逐步回归方法分析土壤 CH_4 吸收量与土壤理化性质(土壤温度、体积含水量、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、pH、DOC)之间的关系。利用 SPSS 16.0 软件进行统计分析,利用 SigmaPlot 10.0 软件进行统计绘图,显著性水平设置为 0.05。

2 结果与分析

2.1 土壤温度、水分、 CH_4 通量的月变化及其对增氮的响应

青藏高原高寒草甸土壤 10cm 温度波动较大,整体呈单峰状态,5 月份最低,7 月份最高,平均温度为 $(9.22 \pm 0.52)^\circ\text{C}$ (图 1)。自然状态下,0—10cm 土壤体积含水量平均为 $(45.86 \pm 1.96) \text{m}^3/\text{m}^3$ (表 1)。5 月末由于冻融作用,土壤含水量出现一个峰值。其它月份土壤含水量则随着观测期间降雨量的改变而改变(图 1)。不同施氮水平下土壤含水量的变化差异显著($P=0.006$,表 2)。中氮处理趋于保水,含水量最高,而低氮和高氮处理趋于耗水。不同施氮类型下土壤含水量差异不显著($P=0.662$,表 2)。

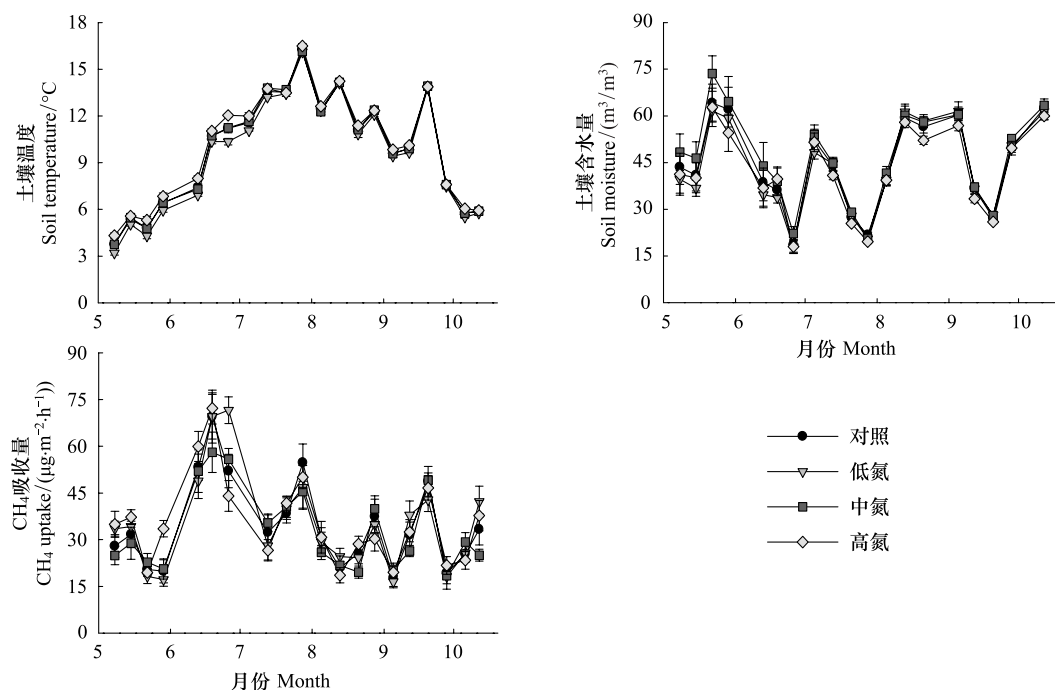


图 1 0—10cm 土壤温度、含水量和 CH_4 吸收量的月变化及其对增氮的响应

Fig. 1 The monthly variation of soil temperature, soil moisture at the 0—10cm depth and soil CH_4 uptake and their responses to N addition

整个生长季,自然状态下高寒草甸土壤 CH_4 吸收量平均值为 $(35.40 \pm 1.92) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,表明高寒草甸土壤是大气 CH_4 净吸收汇(表 1)。土壤 CH_4 吸收量与土壤体积含水量变化格局一致性较好,当体积含水量增加时, CH_4 吸收量降低,反之增加(图 1)。不同月份土壤 CH_4 吸收量差异显著($P<0.001$,表 2),5 月份最低,

6、7 月份较高,最大相差 $32.32 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。不同施氮剂量和施氮类型对土壤 CH_4 吸收没有显著影响 ($P=0.069$ 和 $P=0.755$, 表 2)。

2.2 土壤理化性质的月变化及其对增氮的响应

自然状态下青藏高原高寒草甸土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量平均为 $8.58 \pm 0.63 \text{ mg/kg}$ (表 1), 5 月和 9 月份较低, 其它月份较高。施加不同剂量的氮肥之后土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量略微增大, 其中高氮处理 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 增幅最大 (图 2), 但在统计上不显著 ($P=0.131$, 表 2)。施氮类型对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量的影响边缘显著 ($P=0.085$, 表 2)。较 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 而言, 土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量较高, 平均为 $(18.64 \pm 1.09) \text{ mg/kg}$ (表 1), 说明高寒草甸土壤中有效氮以 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 为主。施氮水平显著增加土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量 ($P=0.001$, 表 2), 其中中氮处理增加量最大 (图 2)。氮素的类型对生长季内 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量的影响并不显著 ($P=0.402$, 表 2)。

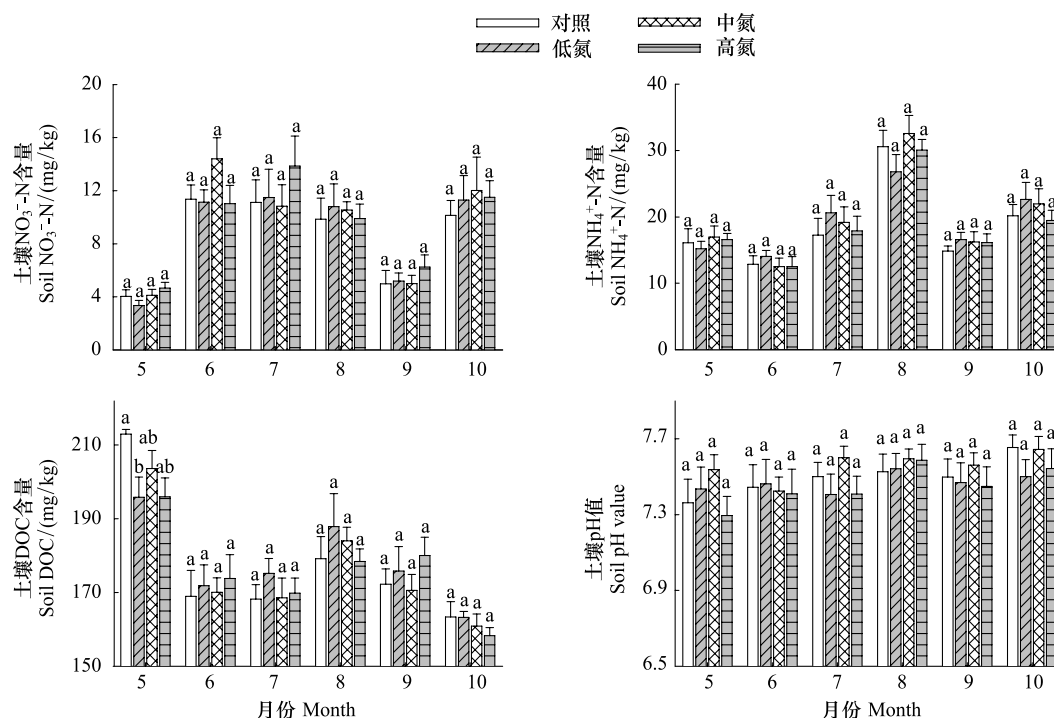


图 2 土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、DOC 和 pH 含量的月变化及其对施氮的响应

Fig. 2 The monthly variation of soil $\text{NO}_3^- \text{-N}$, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, DOC and pH and their responses to N addition

表 1 不同施氮水平下土壤 CH_4 吸收量和土壤理化属性的均值 (标准差)

Table 1 The mean (standard error) of soil CH_4 uptake and soil properties at different N addition levels

施氮水平 N Level	土壤含水量 Soil moisture /(m^3/m^3)	硝态氮 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ /(mg/kg)	铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ /(mg/kg)	溶解性有机碳 DOC /(mg/kg)	pH	CH_4 吸收量 CH_4 uptake /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)
对照 Control	45.86 (1.96)	8.58 (0.63)	18.64 (1.09)	176.78 (2.93)	7.50 (0.04)	35.40 (1.92)
低氮 Low N	44.99 (1.82)	8.88 (0.72)	19.32 (0.98)	177.98 (2.70)	7.47 (0.05)	36.39 (2.03)
中氮 Medium N	48.19 (2.00)	9.49 (0.76)	19.90 (1.18)	176.28 (2.55)	7.57 (0.03)	33.75 (1.68)
高氮 High N	43.73 (1.90)	9.12 (0.35)	18.78 (0.96)	176.06 (2.37)	7.45 (0.05)	36.19 (1.74)

高寒草甸土壤 DOC 含量平均为 $(179.24 \pm 3.31) \text{ mg/kg}$ (表 1), 最高出现在 5 月, 10 月份最低 (图 2)。整个生长季土壤 DOC 呈现明显季节性变化 ($P=0.001$, 表 2), 施氮水平和施氮类型没有显著改变土壤 DOC 含量 ($P=0.390$ 和 $P=0.349$, 表 2)。高寒草甸土壤 pH 均在 7.0 以上 (图 2 和表 1), 不同月份土壤 pH 变化并不明显。另外, 施氮显著改变了土壤 pH ($P=0.043$, 表 2), 低氮和高氮处理倾向于降低土壤 pH, 而中氮处理略

微增加了土壤 pH 值。

表 2 土壤 CH₄ 吸收量和土壤理化属性的重复测量方差分析(响应比)

Table 2 Repeated measure ANOVA of soil CH₄ uptake and soil environmental variables (Response ratio)

RANOVA	T_{10}	R_{Ms}	R_{CH_4}	$R_{NO_3^-}$	$R_{NH_4^+}$	R_{DOC}	R_{pH}
月份 Month	<0.001	0.187	0.020	0.701	0.027	0.001	<0.001
月份×氮水平 Month×N Level	0.008	0.006	0.069	0.131	0.001	0.390	0.043
月份×氮类型 Month×N Form	1	0.662	0.755	0.085	0.402	0.349	0.852
月份×氮水平×氮类型 Month×N level×N Form	1	0.887	0.713	0.670	0.667	0.999	0.838

2.3 土壤 CH₄ 吸收和土壤理化性质之间的关系

由图 3 和表 3 可见,土壤 CH₄ 吸收量与土壤体积含水量呈极显著的负相关关系($R^2=0.43$, $P<0.0001$),在观测时段内高土壤含水量抑制了土壤 CH₄ 吸收;与土壤 NO₃⁻-N 含量呈极显著的正相关关系($R^2=0.12$, $P<0.0001$),在观测时段内土壤 NO₃⁻-N 累积有利于增强土壤 CH₄ 汇功能;同土壤 NH₄⁺-N 含量呈极显著的负相关关系($R^2=0.11$, $P<0.0001$),表明土壤 NH₄⁺-N 的增加能够抑制土壤 CH₄ 吸收;土壤 CH₄ 吸收量与土壤 DOC 含量呈显著的负相关关系($R^2=0.08$, $P<0.0001$),说明 DOC 含量的增加也会降低土壤 CH₄ 吸收强度。另外,土壤 CH₄ 吸收与土壤 pH 值呈弱的负相关关系($R^2=0.02$, $P=0.03$),而与土壤温度相关性不显著。多元逐步回归分析结果表明,土壤 CH₄ 吸收主要受土壤水分驱动,其次是土壤无机氮和 DOC 含量,三者能够解释 CH₄ 吸收量变异的 56%。对于不同的施氮剂量而言,低氮处理促进 CH₄ 吸收,而中氮和高氮处理抑制土壤 CH₄ 吸收。

表 3 土壤 CH₄ 通量与土壤理化属性之间的回归模型

Table 3 Regression models between the soil CH₄ fluxes and the soil variables

土壤理化属性 Soil properties	回归方程 Equation	决定系数 R^2	P
土壤含水量 Soil moisture (Ms)	$F_{CH_4} = 69.96 - 0.69 Ms$	0.43	<0.0001
土壤 DOC 含量 Soil DOC	$F_{CH_4} = 193.37 - 0.44 DOC$	0.08	<0.0001
土壤 NO ₃ ⁻ -N 含量 Soil NO ₃ ⁻ -N	$F_{CH_4} = 4.33 + 0.14 NO_3^- - N$	0.12	<0.0001
土壤 NH ₄ ⁺ -N 含量 Soil NH ₄ ⁺ -N	$F_{CH_4} = 26.00 - 0.19 NH_4^+ - N$	0.11	<0.0001
土壤 pH 值 Soil pH values	$F_{CH_4} = 7.62 - 0.003 pH$	0.02	0.03
综合 Combined	$F_{CH_4} = 73.21 - 0.49 Ms + 0.76 NO_3^- - N - 0.48 NH_4^+ - N - 0.07 DOC + 0.73 Low N - 0.69 Medium N - 1.04 High N$	0.56	<0.0001

3 讨论

观测研究发现,土壤含水量的季节变异和土壤 CH₄ 吸收通量的季节变异格局有着较好的一致性(图 1),说明土壤水分是影响土壤 CH₄ 吸收最重要的因素之一^[17]。土壤含水量通常取决于大气降水、土壤蒸发和植物蒸腾三者的收支平衡^[15]。本研究中各处理样方土壤含水量呈现剧烈的季节波动主要受降水量的影响(图 1)。低氮和高氮处理倾向于降低土壤含水量,而中氮处理倾向于增加。这是由于低氮处理下,地表裸露面积较大,土壤蒸发水分消耗所占比例要远高于植物蒸腾;中氮处理增加了土壤有效氮积累,促进了植物生长,地表裸露面积减少,降低了土壤蒸发的损失比例;高氮进一步增加植物生物量,蒸腾作用加剧,从而不利于土壤水分保持^[16]。但不同生态系统类型土壤含水量对施氮的响应结果并不完全相同。例如 Kim 等^[18]研究发现,在落叶松林中不施氮和施氮之后的土壤体积含水量分别为 25.8 m³/m³ 和 25.6 m³/m³,两者之间并没有显著性差异。回归分析表明土壤含水量的增加能够抑制土壤 CH₄ 吸收,这与许多研究结果类似。Shrestha 等^[19]的实验结果也表明,当土壤湿度从 40 m³/m³ 上升到 60 m³/m³ 时,玉米地和牧草地土壤 CH₄ 吸收量分别下降 73% 和 40%。其内在原因是高土壤含水量条件下土壤孔隙被堵塞,抑制了大气 O₂ 和 CH₄ 向土壤内部扩散,

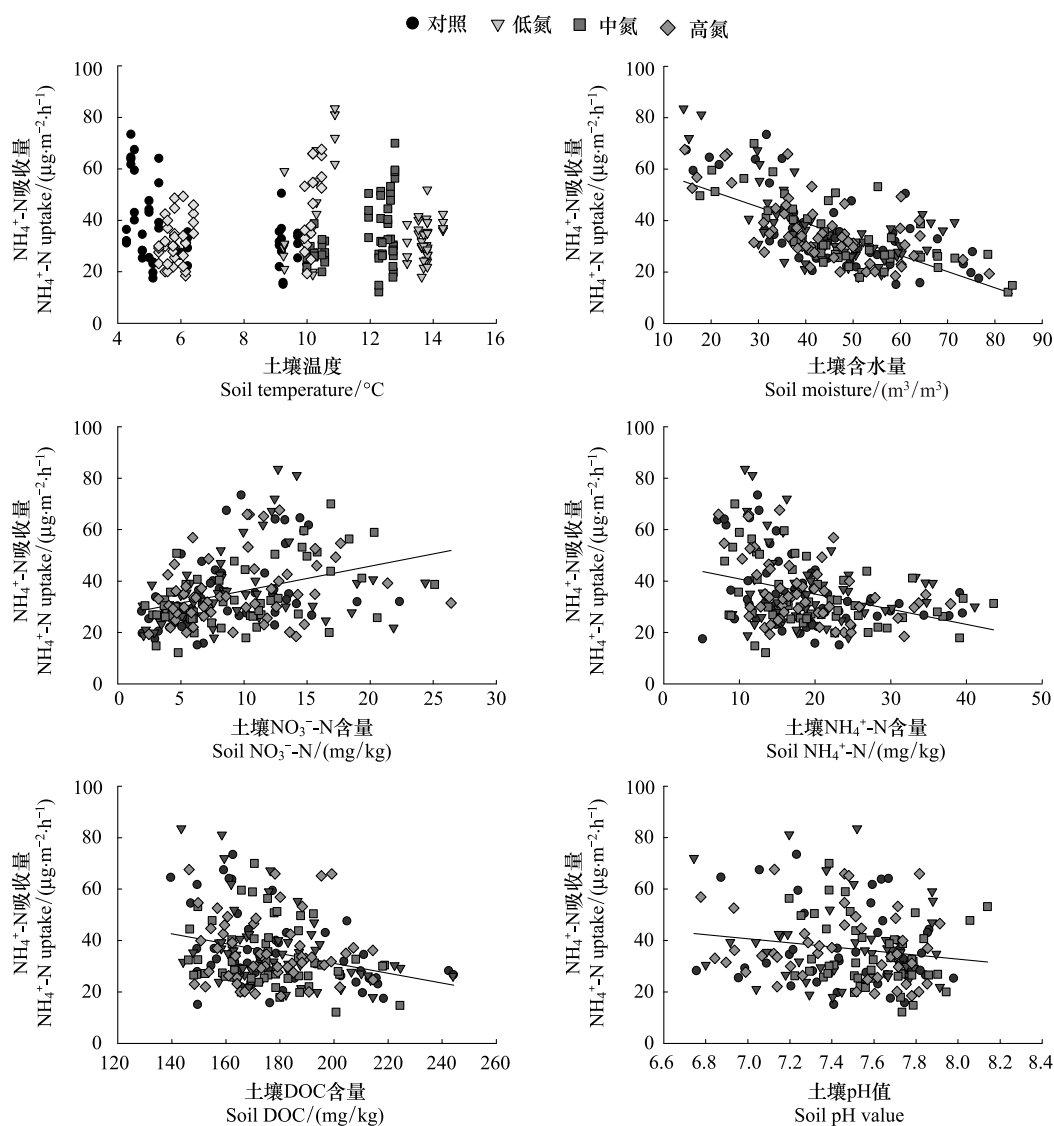


图3 土壤 CH_4 吸收量与土壤温度、含水量、无机氮、DOC 和 pH 值之间的关系

Fig.3 The relationships between soil CH_4 uptake and soil temperature, moisture, inorganic N, DOC contents and pH values

降低了土壤 CH_4 吸收量。但是高体积含水量并不总是抑制土壤 CH_4 吸收, West 和 Schmidt^[20] 在高山苔原进行土壤水分控制实验时发现, 增加水分对土壤 CH_4 氧化存在着一个滞后的促进作用。这是因为当含水量过低时会导致土壤 CH_4 氧化菌 (MOB) 群落因水分限制出现代谢减弱, 进而降低土壤 CH_4 的吸收, 而增加土壤含水量则会改变 MOB 水分限制的状况。由此可见施氮改变了土壤含水量是影响土壤 CH_4 吸收的重要途径。相对于土壤水分而言, 本研究还发现土壤 CH_4 吸收对温度的响应不敏感, 这与许多研究结果类似^[21]。学术界普遍认为温度对 CH_4 氧化的影响小于对 CH_4 产生的影响^[22], Q_{10} 值在 1.1—4.8 之间变化^[22]。另外, 高 CH_4 浓度下 CH_4 氧化对温度的响应比在低 CH_4 浓度下更为显著, 且随底物和甲烷氧化菌群落变化而变化^[22]。值得注意的是, 在 10 月份之后土壤 CH_4 吸收开始回升 (图 1), 可能是由于气温下降, 土壤冻融作用加剧了土壤团聚体的破坏^[23], 导致土壤剖面 O_2 和 CH_4 气体扩散速率增加, 土壤 CH_4 吸收量增大。

土壤 DOC 和 pH 值也是影响土壤 CH_4 吸收的重要因素。高寒草甸土壤 DOC 含量存在明显的季节变化, 不同施氮剂量和类型下无显著性差异。5 月份由于非生长季的积累以及存在强烈的冻融作用, 土壤 DOC 含量最高, 10 月份经过整个生长季土壤微生物的消耗, 达到最低。生长季土壤 DOC 含量的变化是土壤 DOC 累积和消耗过程的综合体现。回归分析结果表明土壤 DOC 的累积会显著降低土壤 CH_4 的吸收量 (图 3), 其内

在的原因是 DOC 是土壤 CH_4 产生菌的主要底物,在适宜的条件下被 CH_4 产生菌群落利用生成 CH_4 排出地表,间接地抵消了土壤 CH_4 的氧化量^[24]。研究表明绝大多数土壤 MOB 群落能够在适宜的 pH 范围(5—8)内存活,并且不同生态系统土壤 MOB 群落生长最适的 pH 范围有所不同^[25]。本研究表明:虽然施氮显著改变了土壤 pH 值,但由于施氮时间较短以及土壤本身具有较强的缓冲性能,土壤 pH 值的绝对变化量并不大,最大变化仅为 0.07 个单位。Arif 等^[26]研究认为,施氮导致土壤 pH 值发生微弱的变化(0.1 个单位)也会显著降低土壤 CH_4 的氧化能力。但是,本研究回归分析结果表明,土壤 pH 值并不是影响高寒草甸土壤 CH_4 吸收的主要因子,土壤 pH 值变化 0.07 个单位尚不足以影响高寒草甸土壤 CH_4 的吸收。

一直以来,土壤中氮素形态和含量动态是土壤 CH_4 吸收最为关键的调控因素。测定结果表明,青藏高原高寒草甸土壤无机氮含量较低(平均 27.22mg/kg),且以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主,占总无机氮含量的 2/3 以上(表 1),是典型的受氮限制的生态系统。其他研究结果也间接支持该观点。例如,一些研究表明青藏高原高寒草甸土壤富含有机氮,特别是低分子量的氨基酸,也是植物利用的有效氮源之一^[27]。研究发现,随着施氮剂量的增加土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量有增加的趋势,但并不显著。不同的施氮类型对土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的影响不显著,但总体上硝态氮肥的输入比 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 更有利于提高土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量,这与 NO_3^- 的直接输入有关。相对于土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量而言,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对施氮剂量和季节变化的响应更为敏感(表 2)。在青藏高原高寒草甸生态系统中,植物同微生物竞争利用土壤有效氮素过程中植物占据更有利地位,偏向于吸收移动性较大的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[28],更有利于土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的积累。回归分析表明不同形态的土壤氮素对 CH_4 吸收影响并不相同, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 具有明显抑制作用。Willison 等^[29]在洛桑试验站 PARK 草地上施加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 后发现土壤 CH_4 吸收能力几乎完全丧失。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 能够引起植物根系和土壤微生物沿土壤剖面下移,从而降低 CH_4 氧化能力^[6]。Bodelier 等^[10]在一篇综述论文中也提到 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是引起土壤 CH_4 氧化能力下降的主要氮素类型,这种抑制作用涉及到多种可能的机制,包括对甲烷单加氧酶(MMO)的竞争性抑制作用和中间产物毒害作用等。丁维新等^[30]则补充提出氮素周转也会导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对 CH_4 氧化的抑制作用。就 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 而言,只有在高 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度条件下才会出现抑制土壤 CH_4 的氧化和吸收,这是渗透压效应导致土壤 MOB 生理性缺水所造成的^[31]。我们的研究结果表明增加土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 能够促进高寒草甸 CH_4 吸收。主要原因是高寒草甸生态系统可利用氮素极端贫乏, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的输入增加凋落物归还量,有利于改善 MOB 营养状况,提高微生物生物量,进而促进土壤 CH_4 的吸收。

不同的施氮剂量对土壤 CH_4 吸收的影响也不相同。回归结果表明,低剂量的氮输入有利于增强青藏高原高寒草甸土壤 CH_4 汇的强度,而中、高剂量的氮输入能够抑制土壤 CH_4 吸收。根据研究结果可以简单推测,在未来大气氮沉降增加 1 倍的情景下高寒草甸土壤 CH_4 汇的功能会有所提高,然而大气氮沉降增加两倍以上时则会降低。如果考虑青藏高原大气氮沉降背景值,那么引起青藏高原高寒草甸土壤 CH_4 吸收转变的大气氮沉降临界水平约为 20—30 $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。该临界值远低于 Aronson 和 Helliker^[21]对全球生态系统整合分析的结果,他们估算出引起全球陆地生态系统土壤 CH_4 吸收转变的大气氮沉降临界值为 100 $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。大气氮沉降临界值差异表明了青藏高原高寒草甸生态系统本身氮素匮乏,生态环境脆弱,对施氮响应较其他陆地生态系统更为敏感。另外,研究结果只是施氮初期的结果,要想得出青藏高原高寒草甸土壤 CH_4 吸收对增氮的中期和后期响应规律需要更长时间的监测,相应地临界氮沉降水平可能也会发生改变。

4 结论

本文基于多形态、低剂量的增氮控制实验,采用静态箱-气相色谱法研究了不同施氮剂量和形态对青藏高原高寒草甸土壤 CH_4 吸收的早期影响,探讨驱动土壤 CH_4 吸收的主要因子。主要结论如下:

(1) 短期内施加低剂量(10 $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)的氮素对青藏高原高寒草甸土壤 CH_4 吸收起促进作用,在未来大气氮沉降增加一倍情景下,能够增强土壤 CH_4 的吸收能力,增加二倍(20 $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)以上情景下土壤 CH_4 吸收能力下降。

(2) 水分是青藏高原高寒草甸土壤 CH_4 吸收的最主要驱动因子,高含水量不利于青藏高原高寒草甸土壤

CH₄ 吸收;其次是 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N, NO₃⁻-N 促进 CH₄ 吸收,而 NH₄⁺-N 抑制土壤 CH₄ 吸收;土壤 DOC 含量的增加也能够抑制土壤 CH₄ 吸收。

References:

- [1] Rodhe H. A Comparison of the Contribution of Various Gases to the Greenhouse-Effect. *Science*, 1990, 248(4960): 1217-1219.
- [2] Duxbury J M. The Significance of Agricultural Sources of Greenhouse Gases. *Fertilizer Research*, 1994, 38(2): 151-163.
- [3] Lamarque J F, Kiehl J T, Brasseur G P, Butler T, Cameron-Smith P, Collins W D, Collins W J, Granier C, Hauglustaine D, Hess P G, Holland E A, Horowitz L, Lawrence M G, Mckenna D, Merilees P, Prather M J, Rasch P J, Rotman D, Shindell D, Thornton P. Assessing future nitrogen deposition and carbon cycle feedback using a multimodel approach: Analysis of nitrogen deposition. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2005, 110(D19): 1-21.
- [4] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z C, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [5] Steudler P A, Bowden R D, Melillo J M, Aber J D. Influence of Nitrogen-Fertilization on Methane Uptake in Temperate Forest Soils. *Nature*, 1989, 341(6240): 314-316.
- [6] Xu X K, Han L, Luo X B, Han S J. Synergistic effects of nitrogen amendments and ethylene on atmospheric methane uptake under a temperate old-growth forest. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(4): 843-854.
- [7] Borken W, Beese F, Brumme R, Lamersdorf N. Long-term reduction in nitrogen and proton inputs did not affect atmospheric methane uptake and nitrous oxide emission from a German spruce forest soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(11): 1815-1819.
- [8] Bodelier P L E, Roslev P, Henckel T, Frenzel P. Stimulation by ammonium-based fertilizers of methane oxidation in soil around rice roots. *Nature*, 2000, 403(6768): 421-424.
- [9] Bodelier P L E, Hahn A P, Arth I R, Frenzel P. Effects of ammonium-based fertilisation on microbial processes involved in methane emission from soils planted with rice. *Biogeochemistry*, 2000, 51(3): 225-257.
- [10] Bodelier P L E, Laanbroek H J. Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments. *Fems Microbiology Ecology*, 2004, 47(3): 265-277.
- [11] Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau. *Ecology Letters*, 2004, 7(12): 1170-1179.
- [12] Lü C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: Synthesis of observational data. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2007, 112(D22): doi: 10.1029/2006JD007990.
- [13] Jiang C M, Yu G R, Fang H J, Cao G M, Li Y N. Short-term effect of increasing nitrogen deposition on CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(24): 2920-2926.
- [14] Zhou X M. *Kobresia humilis* meadow in China (in Chinese). Beijing: Science press, 2001: 1-297.
- [15] Liu S, Yu G R, Asanuma J, Sugita M, Zhang L M, Zhao F H, Hu Z M, Li S G. The thawing-freezing processes and soil moisture distribution of the steppe in Central Mongolian Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 46-51.
- [16] Zhu T H, Cheng S L, Fang H J, Yu G R, Zheng J J, Li Y N. Early responses of soil CO₂ emission to simulating atmospheric nitrogen deposition in an alpine meadow on the Qinghai Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2687-2696.
- [17] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(1): 25-50.
- [18] Kim Y S, Imori M, Watanabe M, Hatano R, Yi M J, Koike T. Simulated nitrogen inputs influence methane and nitrous oxide fluxes from a young larch plantation in northern Japan. *Atmospheric Environment*, 2012, 46(1): 36-44.
- [19] Shrestha B M, Sitala B K, Singh B R, Bajracharya R M. Fluxes of CO₂ and CH₄ in soil profiles of a mountainous watershed of Nepal as influenced by land use, temperature, moisture and substrate addition. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 68(2): 155-164.
- [20] West A E, Schmidt S K. Wetting stimulates atmospheric CH₄ oxidation by alpine soil. *Fems Microbiology Ecology*, 1998, 25(4): 349-353.
- [21] Aronson E L, Helliker B R. Methane flux in non-wetland soils in response to nitrogen addition: a meta-analysis. *Ecology*, 2010, 91(11): 3242-3251.
- [22] Zheng J. Responses of Transformation and Loss Process of Soil Carbon to Simulating Atmospheric Nitrogen Deposition in an Alpine Meadow on the Qinghai Tibetan Plateau [D]. Beijing. 2011.
- [23] Lehrs G A, Sojka R E, Carter D L, Jolley P M. Freezing Effects on Aggregate Stability Affected by Texture, Mineralogy, and Organic-Matter. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(5): 1401-1406.

- [24] Michalzik B, Matzner E. Dynamics of dissolved organic nitrogen and carbon in a Central European Norway spruce ecosystem. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50(4): 579-590.
- [25] Knief C, Lipski A, Dunfield P F. Diversity and activity of methanotrophic bacteria in different upland soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, 69(11): 6703-6714.
- [26] Arif M A S, Houwen F, Verstraete W. Agricultural factors affecting methane oxidation in arable soil. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 21(1/2): 95-102.
- [27] Xu X L, Ouyang H, Kuzyakov Y, Richter A, Wanek W. Significance of organic nitrogen acquisition for dominant plant species in an alpine meadow on the Tibet plateau, China. *Plant and Soil*, 2006, 285(1/2): 221-231.
- [28] Song M, Xu X, Hu Q, Tian Y, Ouyang H, Zhou C. Interactions of plant species mediated plant competition for inorganic nitrogen with soil microorganisms in an alpine meadow. *Plant and Soil*, 2007, 297(1): 127-137.
- [29] Willison T W, Webster C P, Goulding K W T, Powlson D S. Methane Oxidation in Temperate Soils-Effects of Land-Use and the Chemical Form of Nitrogen-Fertilizer. *Chemosphere*, 1995, 30(3): 539-546.
- [30] Ding W X, Cai Z C. Mechanism of Nitrogen Fertilizer Suppressing Atmospheric Methane Oxidation by Methanotrophs in Soils. *Rural Eco-environment*, 2001, 17(3): 30-34.
- [31] Cheng S L, Fang H J, Yu G R, Xu M J, Zhang P L, Zheng J J, Gao W L, Wang Y S. The primary factors controlling methane uptake from forest soils and their responses to increased atmospheric nitrogen deposition: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4914-4923.

参考文献:

- [12] 周兴民. 中国高草草甸. 科学出版社, 2001: 1-297.
- [13] 刘帅, 于贵瑞, 浅沼顺, 杉田伦明, 张雷明, 赵风华, 胡中民, 李胜功. 蒙古高原中部草地土壤冻融过程及土壤含水量分布. *土壤学报*, 2009, 46(001): 46-51.
- [14] 朱天鸿, 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 郑娇娇, 李英年. 青藏高原高寒草甸土壤 CO₂ 排放对模拟氮沉降的早期响应. *生态学报*, 2011, 31(10): 2687-2696.
- [16] 郑娇娇. 青藏高原高寒草甸土壤碳转化和损失过程对模拟氮沉降的响应[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [23] 丁维新, 蔡祖聪. 氮肥对土壤氧化大气甲烷影响的机制. *农村生态环境*, 2001, 17(3): 30-34.
- [31] 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 徐敏杰, 张裴雷, 郑娇娇, 高文龙, 王永生. 森林土壤甲烷吸收的主控因子及其对增氮的响应研究进展. *生态学报*, 2012, 32(15): 4914-4923.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 13 Jul. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- A review of ecological effects of remnant trees in degraded forest ecosystems after severe disturbances MIAO Ning, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3889)
- Mechanism and application of bioremediation to heavy metal polluted soil using arbuscular mycorrhizal fungi LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LIN Shuangshuang, et al (3898)

Autecology & Fundamentals

- Changes of allometric relationships among leaf traits in different ontogenetic stages of *Acer mono* from different types of forests in Donglingshan of Beijing YAO Jing, LI Ying, WEI Liping, et al (3907)
- The combined effects of increasing CO₂ concentrations and different temperatures on the growth and chlorophyll fluorescence in *Porphyra haitanensis* (Bangiales, Rhodophyta) LIU Lu, DING Liuli, CHEN Weizhou, et al (3916)
- Research on biomass expansion factor of chinese fir forest in Zhejiang Province based on LULUCF greenhouse gas Inventory ZHU Tangjun, SHEN Chuchu, JI Biyong, et al (3925)
- Influence of soil gradual drought stress on *Acorus calamus* growth and photosynthetic fluorescence characteristics WANG Wenlin, WAN Yinjing, LIU Bo, et al (3933)
- Isolation, identification, real-time PCR investigation of an endophytic phosphate-solubilizing bacteria from *Caragana korshinskii* Kom. roots ZHANG Lizhen, FENG Lili, MENG Qixia, et al (3941)
- Plant's and soil organism's diversity across a range of *Eucalyptus grandis* plantation ages ZHANG Danju, ZHANG Jian, YANG Wanqin, et al (3947)
- Effects of diet and starvation on growth and survival of *Scapharca broughtonii* larvae WANG Qingzhi, ZHANG Ming, FU Chengdong, et al (3963)
- Multidrug-resistant bacteria in livestock feces QI Shiyue, REN Siwei, LI Xueling, et al (3970)
- Physiological regulation related to the decline of *Alexandrium catenella* MA Jinhua, MENG Xi, ZHANG Shu, et al (3978)
- Numerical simulation of water quality based on environmental fluid dynamics code for grass-algae lake in Inner Mongolia LI Xing, SHI Hongsen, ZHANG Shuli, et al (3987)

Population, Community and Ecosystem

- Influence of enclosure on *Glycyrrhiza uralensis* community and distribution pattern in arid and semi-arid areas LI Xuebin, CHEN Lin, LI Guoqi, et al (3995)
- The interannual variation of net primary productivity of three coniferous forests in Liupan Mountains of Ningxia and its responses to climatic factors WANG Yunni, XIONG Wei, WANG Yanhui, et al (4002)
- Soil water use and balance characteristics in mature forest land profile of *Caragana korshinskii* in Semiarid Loess Area MO Baoru, CAI Guojun, YANG Lei, LU Juan, et al (4011)
- Effect of simulated acid deposition on chemistry of surface runoff in monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan QIU Qingyan, CHEN Xiaomei, LIANG Guohua, et al (4021)
- A space optimization model of water resource conservation forest in Dongting Lake based on improved PSO LI Jianjun, ZHANG Huiru, LIU Shuai, et al (4031)
- Allelopathic effects of aqueous extract of exotic plant *Rhus typhina* L. on soil micro-ecosystem HOU Yuping, LIU Lin, WANG Xin, et al (4041)
- The impact of natural succession process on waterbird community in a abandoned fishpond at Chongming Dongtan, China YANG Xiaoting, NIU Junying, LUO Zukui, et al (4050)
- Mercury contents in fish and its biomagnification in the food web in Three Gorges Reservoir after 175m impoundment YU Yang, WANG Yuchun, ZHOU Huaidong, et al (4059)

- Microsatellite analysis on genetic diversity of common carp, *Cyprinus carpio*, populations in Yuan River
 YUE Xingjian, ZOU Yuanchao, WANG Yongming, et al (4068)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Research on spatio-temporal change of temperature in the Northwest Arid Area HUANG Rui, XU Ligang, LIU Junmin (4078)
- Simulation of soil respiration in forests at the catchment scale in the eastern part of northeast China
 GUO Lijuan, GUO Qingxi (4090)
- The early effects of nitrogen addition on CH₄ uptake in an alpine meadow soil on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau
 ZHANG Peilei, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (4101)
- Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services ZHANG Yi, ZHANG Heping (4111)
- The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen
 WU Jiansheng, ZHANG Liqing, PENG Jian et al (4125)
- Carbon sources and storage sinks in scenic tourist areas: a Mount Lushan case study
 ZHOU Nianxing, HUANG Zhenfang, LIANG Yanyan (4134)
- Impacts of climate change on dominant pasture growing season in Central Inner Mongolia
 LI Xiazi, HAN Guodong, GUO Chunyan (4146)
- Phenological Characteristics of Typical Herbaceous Plants (*Lris lacteal*) and Its Response to Climate Change in Minqin Desert
 HAN Fugui, XU Xianying, WANG Lide, et al (4156)
- Biomass and distribution pattern of carbon storage in *Eomecon chionantha* Hance
 TIAN Dalun, YAN Wende, LIANG Xiaocui, et al (4165)
- Temporal dynamics and influencing factors of fine roots in five Chinese temperate forest ecosystems
 LI Xiangfei, WANG Chuankuan, QUAN Xiankui (4172)

Resource and Industrial Ecology

- Effects of AMF on soil improvement and maize growth in mining area under drought stress
 LI Shaopeng, BI Yinli, CHEN Peizhen, et al (4181)

Urban, Rural and Social Ecology

- Health function evaluation and exploring its mechanisms in the Shanghai Green Belt, China
 ZHANG Kaixuan, ZHANG Jianhua (4189)

Research Notes

- Time lag effects of rainfall inside a *Platycladus Orientalis* plantation forest in the Beijing Mountain Area, China
 SHI Yu, YU Xinxiao, ZHANG Jiayin (4199)
- Long-term effects of harvest residue management on soil total carbon and nitrogen concentrations of a replanted Chinese fir
 plantation HU Zhenhong, HE Zongming, FAN Shaohui, et al (4205)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 彭少麟

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 13 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 13 (July, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元