

DOI: 10.5846/stxb201907121462

陈琳,曾冀,李华,刘士玲,雷丽群,刘世荣.全球降水格局变化下土壤氮循环研究进展.生态学报,2020,40(20):7543-7551.

Chen L, Zeng J, Li H, Liu S L, Lei L Q, Liu S R. Research advances in the soil nitrogen cycle under global precipitation pattern change. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7543-7551.

全球降水格局变化下土壤氮循环研究进展

陈琳^{1,2}, 曾冀^{1,2}, 李华^{1,2}, 刘士玲^{1,2}, 雷丽群^{1,2}, 刘世荣^{3,*}

1 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 凭祥 532600

2 广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 凭祥 532600

3 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091

摘要:自然和人为因素导致全球降水格局发生改变,降水变化势必影响土壤氮循环,从而影响陆地生态系统生产力和多样性,然而不同降水变化类型对土壤氮循环的影响仍然缺乏足够的认识。因此,本文综合分析了全球和我国降水格局变化特征,简要介绍了6种降水格局变化下土壤氮循环的研究方法(长期降水固定观测、野外降水控制实验、自然降水梯度、室内培养、模型和遥感),系统综述了3种降水变化类型(降水波动、干旱、干湿交替),以及降水与温度、氮沉降等交互作用对土壤氮循环影响的研究进展与存在的问题,并展望了未来研究方向,为评估和预测未来降水变化对陆地生态系统功能的影响提供理论依据。

关键词:干旱;干湿交替;降水波动;交互作用;土壤氮循环

Research advances in the soil nitrogen cycle under global precipitation pattern change

CHEN Lin^{1,2}, ZENG Ji^{1,2}, LI Hua^{1,2}, LIU Shiling^{1,2}, LEI Liqun^{1,2}, LIU Shirong^{3,*}

1 Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 532600, China

2 Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang 532600, China

3 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: Natural and human factors have led to the global precipitation pattern changes, which will influence the soil nitrogen cycle processes, and the production and biodiversity of the terrestrial ecosystems. However, the impact of different types of precipitation on soil nitrogen cycle is still insufficiently understood. Therefore, we briefly introduce the global and China precipitation changes, as well as six research methods of soil nitrogen cycle under the change of precipitation pattern (long-term precipitation observation, field precipitation control experiment, natural precipitation gradient, indoor cultivation, model and remote sensing). Furthermore, we summarize the effects of three types of precipitation change (precipitation variation, drought and drying-rewetting event) and the interaction effects between precipitation and other climatic factors, including temperature and nitrogen deposition, on the soil nitrogen cycle, respectively. Finally, we analyze the problems in this field and provide recommendations for what the research directions are in the future. This review will improve assess and predict the response of terrestrial ecosystem functions to the potential precipitation change.

Key Words: drought; drying-rewetting event; precipitation variation; interaction effect; soil nitrogen cycle

工业革命以来,气溶胶和温室气体排放大量增加,加上气候内部变率影响,如厄尔尼诺-南方涛动、太平洋

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(31800533);中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基金(CAFYBB2017026)

收稿日期:2019-07-12; 修订日期:2020-05-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Liusr@caf.ac.cn

年代际振荡、北大西洋涛动,导致全球降水格局发生变化,但不同地区降水存在差异^[1]。土壤氮循环是陆地生态系统生物地球化学循环的重要组成部分,直接影响碳循环、食物供应和水土保持等生态系统服务功能^[2]。研究土壤氮循环对降水变化的响应,对评估和预测未来降水变化如何影响陆地生态系统服务功能具有重要意义。

土壤氮循环一般包括氮输入(生物固氮、氮沉降和凋落物)、内部循环(矿化和固持、硝化和反硝化、厌氧氨氧化和硝酸盐异化还原为氨)、输出(氨挥发、氮氧化物排放和氮淋溶)和积累(植物和土壤氮库)4个部分^[3-4]。土壤氮循环受到诸多因素影响,包括非生物因素(气候、地形和土壤理化性质)^[5-7]、生物因素(植被竞争、土壤动物及微生物)^[8-10]和人类活动(生物炭和氮添加、间伐和土地利用类型改变)^[11-14],其中降水是影响土壤氮循环关键的非生物因素之一^[15]。目前,利用长期降水观测、野外降水控制实验、自然降水梯度、室内培养、模型和遥感等方法^[16-18],已经开展了不同生态系统土壤氮循环对降水变化的响应研究。由于野外降水控制实验较真实反映了未来降水变化对土壤氮循环的影响,因此本文重点分析了利用该方法开展的土壤氮循环对降水变化的响应研究进展,结果表明降水可能通过改变土壤湿度、侵蚀、淋溶直接影响土壤氮循环,也可能通过改变土壤理化性质、土壤动物、微生物群落组成和功能、植物氮吸收、植物群落物种组成和多样性而间接影响土壤氮循环^[19-20]。

由于降水变化存在空间差异和时间变化,因此根据不同地区降水特点探讨其对土壤氮循环的影响是十分必要的^[21]。根据各地区的降水变化特征可大致分为3种类型:降水波动、干旱和干湿交替。降水波动,指年度和季节降水量、强度和频率在一定时期内增加或减少,降水波动对土壤氮循环的影响程度因降水强度和持续时间而异。干旱是一个相对的概念,指长期或短期缺水引起土壤水分和养分胁迫,从而导致植物生长受到抑制,引发病虫害和火灾,甚至造成植物死亡、植被组成和多样性发生改变^[18, 22-23]。相对于降水波动和干旱,干湿交替是一种干旱后短期覆水现象,主要出现在干旱和半干旱生态系统中,少数现在湿润生态系统中。干湿交替使土壤物理、化学性质和微生物特性等发生变化,从而对土壤氮矿化和损失有重要影响^[24]。土壤氮循环除了受到降水的影响,还受到温度、氮沉降、CO₂浓度、土地利用类型改变等因素的影响^[25-27]。受到技术和经济条件的限制,全球变化多因素控制实验大部分发生在草原生态系统,其中降水与温度、降水与氮沉降交互作用研究相对较多,因不同研究区域的气候、植被、土壤和实验处理等存在差别,使研究结果并不一致。为了更好地梳理、评估和预测全球降水变化对土壤氮循环的影响,本文综合分析了全球和我国降水格局变化特征,简要介绍了6种降水格局变化下土壤氮循环的研究方法,综述了3种降水变化类型(降水波动、干旱、干湿交替),以及降水与温度、氮沉降交互作用对土壤氮循环影响的研究进展,分析了当前研究中存在的问题和未来的研究重点。

1 全球和我国降水格局变化

1.1 全球降水格局变化

近百年,北半球中纬度地区年降雨量整体增加,在1901—1951年为中等信度,而1951年以后达高信度,其他纬度地区年降雨量的变化趋势为正或负,其可信度低。21世纪末,在典型浓度路径RCP 8.5情境下(相当于2100年时1370 ppm的CO₂浓度水平),高纬度和赤道太平洋地区的年降雨量将呈上升趋势,中纬度和亚热带干旱地区的年降雨量可能会减少,而中纬度湿润地区可能会有所增加。随着气候变暖,全球水循环将加快,部分中纬度和热带湿润地区的极端降水事件很可能变得更加频繁和强烈,如暴雨、洪涝和干旱^[1]。未来百年,南北半球降水差距和降水季节波动可能加大,旱季更早,雨季更湿^[28]。

1.2 我国降水格局变化

近50年,我国平均年降水量没有表现出明显的趋势性变化,但是区域性降水变化趋势明显,主要表现在华北、西北东部、东北南部和西南部分地区降水减少,西部大部分地区降水增加^[29]。另外,我国极端天气和气候事件发生频率和强度也出现了变化。根据1960—2013年我国降雨观测资料,发现每10年干旱天数增加

3.78%,特大暴雨次数增加 1.51%,小雨和中雨次数分别减少 1.25%和 1.14%^[30]。预计 21 世纪,我国降水整体呈上升趋势,同时降水上升过程伴有明显的年代际波动^[31]。2016—2100 年,约 1.5%—3.5%的陆地面积将从湿润区变成半干旱或半湿润区;在空间上,西北和华南的干旱化趋势较明显,而东北和西南地区呈弱变湿倾向;在季节上,东北、华北和西北地区以暖季变干为主,华南和西南则以冷季变干为主^[32]。

2 降水格局变化下土壤氮循环的研究方法

目前,降水格局变化下土壤氮循环的研究方法主要有:长期降水固定观测、野外降水控制实验、自然降水梯度、室内培养、模型和遥感。

(1) 长期降水固定观测,通过监测陆地生态系统降水和土壤氮循环动态变化,揭示陆地生态系统土壤氮循环对降水的长期响应,但是该方法不能排除温度和生物活动等其他因素的干扰^[18]。

(2) 野外降水控制实验,通过模拟自然降水时间、强度和频率等,运用埋袋、离子交换树脂、PVC 顶盖埋管法、树脂芯、静态箱、同位素等测定方法^[27, 33],评估生态系统土壤氮循环过程,该方法较真实反映土壤氮循环对不同降水情景的响应,因此被广泛使用。然而受到技术和设备条件限制,降水与其他因子交互作用研究较少,特别是森林生态系统,如果实验样地面积较小,观测时间较长,应当尽量减少破坏性取样。

(3) 自然降水梯度,以空间代替时间,利用自然降水梯度开展土壤氮循环研究,在揭示不同生态系统降水敏感性和临界值方面提供更有价值的信息。在选择样地时,必须保证除了降水以外的其他条件基本一致,因此该方法不适合开展多因子交互作用研究^[34-35]。

(4) 室内培养,通过室内培养实验,区分土壤氮转化对温度和湿度的敏感性,利用土壤氮矿化与土壤温度和湿度拟合方程,对土壤氮有效性进行评价。由于实验处理、取样频率、土壤取样、储存和运输等可能影响土壤氮的测定结果,因此用于检测短期土壤氮动态是有限的^[17, 36]。

(5) 模型,一种预测陆地生态系统对降水变化响应的有效方法,土壤氮循环模型根据建模方法,分为经验模型和机理模型。经验模型,通过测定土壤氮循环过程,确定影响因子的相关参数,采用曲线拟合建立方程,优点是建模所需的参数较少,使用较为方便,缺点是受时间和空间的限制较大,无法得到广泛应用和推广。机理模型,考虑了土壤氮循环容易受到气候、土壤条件、植被类型等多种因素的影响,理论性强,可用于土壤氮循环的长期动态观测,缺点是需要大量的气象、水文、植被和土壤等基础数据作为支撑,而且要求建模者对土壤氮循环过程有深入的研究^[16, 37-39]。

(6) 遥感,利用卫星遥感影像跟踪监测降水变化条件下土壤氮循环的动态变化,以评估和预测降水变化对土壤氮循环的影响^[18]。此方法的优点是可实现大尺度多点连续动态实时监测,提高了监测的时效性和准确性,缺点是需要配备相应的软硬件设备,并且技术含量要求较高,目前将遥感等 3S 技术与土壤氮循环模型相结合已成为未来发展的趋势。

上述方法各有优缺点,因此应该根据研究目的,选择合适的研究方法,或者采用多种方法来提高结果的可靠性和准确性^[17]。

3 降水对土壤氮循环的影响

3.1 降水波动对土壤氮循环的影响

土壤氮循环与降水量关系密切,年降雨量小于 100mm,土壤氮循环主要由非生物因素决定;年降雨量大于 100mm,生物因素的作用可能更大^[40]。一般情况下,降雨量增加将提高土壤湿度,促进无机氮淋溶、反硝化作用、植物和微生物氮吸收,加快土壤氮矿化速率,降低土壤无机氮含量;相反降水减少将导致土壤湿度下降,抑制植物和微生物活动,降低土壤氮矿化速率和 N_2O 排放,提高土壤无机氮含量^[41-42]。然而,另外一些研究表明,降水并不会显著影响土壤氮矿化速率,有些因为土壤微生物对适度干旱具有一定的抵抗力^[43-44];或者地上净初级生产力和植物氮吸收未受影响^[45];或者因为土壤净氮矿化速率和净硝化速率的温度敏感性

(Q_{10}) 下降^[46]。

除了受降水量的影响,土壤氮循环还受季节降水变化的影响。在干旱和半干旱生态系统中,旱季,土壤氮周转率低,微生物死亡加剧,植物吸收养分能力下降,导致土壤 NO_3^- 含量、不稳定有机质含量和 NH_3 挥发增加;雨季,粗质地土壤的氮矿化速率呈线性增加,细质地土壤的氮矿化速率则先增加而后趋于饱和,土壤不稳定有机质含量由于土壤微生物活动和植物吸收养分能力的增加而显著下降,而土壤 NO_3^- 淋洗、反硝化损失、氨化和固氮作用增加。另外,短期降水使氨挥发和反硝化的氮损失增加,虽然氮损失的量少,但长期累积的损失却远大于湿润生态系统^[47]。土壤氮净矿化速率亦具有明显的季节性,美国新泽西州橡树 (*Quercus* sp.) 和松树 (*Pinus* sp.) 混交林的土壤净氮矿化速率与土壤湿度的关系随着季节发生变化,在 5、7 和 9 月份两者的关系分别呈负相关、正相关和不相关^[48]。美国大弯国家公园荒漠草原 7 年季节增雨实验,增雨 25% 第 3—5 年其土壤微生物量和丛枝菌根真菌丰度显著高于自然降雨,增雨处理第 5—7 年其土壤硝态氮和有效磷含量显著低于自然降雨,表明土壤微生物和养分对季节性降水变化的响应具有滞后效应^[49]。以往开展的降水波动对土壤氮循环的影响研究时间较短,通常为 1—4 年,对揭示土壤氮循环对降水变化的长期响应具有一定局限性。

3.2 干旱对土壤氮循环的影响

21 世纪干旱强度、频率和范围将进一步扩大,如果干旱恢复时间小于干旱发生间隔,将导致陆地生态系统生产力持续下降^[50]。根据干旱产生原因分为:季节性干旱、极端干旱和实验性干旱^[18]。基于以往的野外干旱模拟实验,总结归纳出三方面的研究内容,即土壤氮库、 N_2O 排放和氮碳磷耦合效应对干旱的响应。

土壤氮库对干旱的响应主要受干旱强度和干旱间隔时间的影响。去除降水 100% 两年,受土壤水分扩散的影响,植物和微生物对氮素的吸收减少,美国橡树 (*Quercus* sp.) 和松树 (*Pinus* sp.) 混交林单位土壤有机质的氨态氮含量明显升高,从 $84 \mu\text{g/g}$ 增加到 $640 \mu\text{g/g}$ ^[48]。然而,改变干旱间隔时间 (每 7 d 和 21 d 浇水 1 次) 并未改变栓皮栎 (*Quercus suber*) 土壤氨态氮和硝态氮含量,一方面是因为林下植物产量及其对氮素需求未受干旱间隔时间的影响,另一方面是因为土壤氨态氮受土壤湿度的影响较小^[45]。

干旱会抑制土壤 N_2O 的产生和排放,但是抑制程度存在很大的空间异质性和树种差异^[51]。夏季干旱处理 3 个月不同程度地减少了热带森林 (山脊、山坡和山谷) 的土壤湿度和交换磷含量,从而降低了土壤 N_2O 净排放^[52]。Meier 等^[53] 采用人工气候培养箱对欧洲槭树 (*Acer pseudoplatanus*)、山毛榉 (*Fagus sylvatica*)、椴树 (*Tilia cordata*) 和白蜡树 (*Fraxinus excelsior*) 4 个树种进行 7 周夏季干旱处理,亦发现夏季干旱显著抑制土壤 N_2O 排放,然而由于树种之间土壤温湿度、细根产量、菌根类型、叶面积和叶片光合速率不同,使土壤 N_2O 排放受干旱抑制程度有所差异。

干旱条件下碳氮磷循环容易发生解耦合,从而影响生态环境和生产力。如 Evans 和 Burke^[54] 在美国草地进行 11 年夏季干旱处理,发现土壤无机氮含量比对照提高了 5 倍,但是受到土壤水分限制,地上、地下部分生物量、土壤 CO_2 排放均显著低于对照,表明碳氮循环发生了解耦合。同样, Fry 等^[55] 发现英国草地碳氮磷循环发生了解耦合,因为延长夏季干旱提高土壤氮磷含量,而冬季增雨补充了土壤水分,夏季干旱对生态系统净 CO_2 交换量和光合速率无影响。Dijkstra 等^[56] 亦发现澳大利亚草原植物氮吸收对干旱的敏感性大于微生物氮吸收,而植物磷吸收对干旱敏感性则小于微生物磷吸收,表明氮磷循环发生了解耦合。近年来,碳氮磷水循环耦合过程及其相互作用已经成为生态学研究的重点方向之一,然而降水变化下森林生态系统的碳氮磷水循环耦合作用机制研究相对缺乏,因此这方面有待加强。

3.3 干湿交替对土壤氮循环的影响

干湿交替是一种土壤和水文热力学短期过渡现象,湿润—干旱—再湿润反复循环过程,再润湿和解冻事件是由当地的气候条件、地形、排水、植被类型和土壤热性质决定的^[57]。干湿交替通过影响土壤团聚体结构和土壤胀缩性、土壤微生物活性和群落,从而对土壤氮矿化和氮损失产生影响。

土壤氮素的矿化方面,与恒湿处理相比,干湿交替 (采用室内培养,每 7 d 或 14 d 浇水 1 次,共 72 d) 降

低了北美 4 个不同降水梯度草地土壤净氮矿化速率,但提高了土壤微生物氮的吸收^[58]。在半干旱地区樟子松人工林,干湿交替下(采用室内培养,每 5 d 或 10 d 浇水 1 次,共 20 d)土壤硝态氮含量显著小于恒湿处理,而其土壤硝态氮含量和净硝化速率显著高于恒干处理;干湿交替结束后(复水 10 d),不同处理之间土壤净硝化速率则无显著差异^[59]。

在土壤氮损失方面, Kim 等^[57]分析了 1956—2011 年陆地生态系统土壤温室气体排放通量对干湿交替的响应,包括野外和实验室的观测数据,研究表明土壤 N_2O 和 NO 排放干旱时期呈下降趋势,覆水后土壤微生物代谢随着土壤水有效性增加而增加,使土壤 N_2O 和 NO 排放反而升高。与 4 周干旱后覆水处理相比,8 周干旱后覆水处理显著增加了欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*)土壤硝态氮和可溶性有机氮的淋洗^[60]。以往的研究结果发现,干湿交替条件下土壤氮矿化和氮损失均呈现出“增加-减少-增加”的变化规律,然而干季和湿季交替变化的研究案例大部分是短期的实验,对理解长期的干湿交替变化十分有限。

4 降水与其他因子的交互作用对土壤氮循环的影响

4.1 降水与温度的交互作用对土壤氮循环的影响

全球气候变化导致降水格局发生变化,同时引起全球气温上升^[1]。降水和温度的交互作用显著影响土壤理化性质和生物过程,从而影响土壤氮循环,特别对土壤氮转化、氮含量和氮损失的影响,主要分增温条件下增雨和减雨两种情形。

增温条件下增雨, Schaeffer 等^[33]对格陵兰高寒极地苔原生态系统进行增温 4℃、增加夏季降水量、增温 4℃且增加夏季降水量等处理,7 年后增温和夏季增雨处理导致表层土壤净硝化速率和硝态氮淋溶显著增加,而土壤总有机氮含量明显下降,表明未来增温和夏季增雨将加剧高寒极地苔原生态系统土壤氮损失。增温和增雨分别导致美国宾夕法尼亚州采伐后森林无机氮淋溶和土壤 N_2O 排放增加,而氮损失的形式和数量主要取决于该地区未来是否增温、增雨、或两者兼有^[61]。Brown 等^[62]在美国草地开展增温、增雨、 CO_2 升高和施氮 4 因素实验,发现增雨显著增加了土壤湿度和可利用碳含量,引起反硝化作用增加,进而促进了土壤 N_2O 排放,特别是在施氮和增温情况下。总之,在增温和增雨条件下由于土壤矿化、反硝化和淋溶作用的增强,导致氮损失趋于增加。

增温条件下减雨,增温、 CO_2 升高和夏季干旱将导致丹麦荒原土壤氮有效性降低,而且三者之间存在交互作用^[63]。但是, Auyeung 等^[46]发现增温和干旱几乎对美国弃耕地土壤氮矿化无影响,表明增温和干旱不存在交互作用,这是因为增温和干旱降低了土壤氮矿化对温度的敏感性 Q_{10} 。草地生态系统土壤氮对增温和减雨的抗性随着植物覆盖度的增加而增加^[64]。蛋白水解酶参与土壤有机质释放氨基酸,是土壤氮内循环的主要驱动力。Brzostek 等^[65]从 16 个全球控制降水和温度实验采集土壤,发现增温和减雨提高了温带和寒带森林、北极苔原土壤蛋白水解酶活性,但抑制了干旱草地的土壤蛋白水解酶活性,可能因为对于湿润寒冷生态系统土壤温度对氮循环的重要限制因子微生物起主要作用,而对于干旱温暖生态系统土壤湿度则起主要作用^[66-67]。

4.2 降水与氮沉降的交互作用对土壤氮循环的影响

降水和氮素是决定生态系统生产力的关键因素,降水、氮素及其交互作用显著影响土壤氮矿化、氮损失和植物氮利用等土壤氮循环过程。将降水与氮沉降的交互作用对土壤氮循环的影响分为三种情形:干旱和施氮、增雨和施氮、以及干湿交替和施氮。

干旱和施氮, Hartmann 等^[68]研究发现施牛粪或硝酸铵促进 N_2O 排放,而干旱条件下施氮导致植物氮吸收、硝化和反硝化作用下降,从而使土壤无机氮浓度升高。相反,增雨和施氮(硝酸铵或尿素)的交互效应对内蒙古贝加尔针茅草甸土壤铵态氮含量有明显的促进作用,其中水分是影响土壤铵态氮和净氮化速率的主要因子,而氮素是影响土壤硝态氮和土壤净硝化速率的关键因子^[69]。

干湿交替通常导致土壤氮矿化速率降低和氮损失增加,然而在施氮情况下氮损失可能会有所降低。

Morillas 等^[70]研究发现,增加干湿交替频率使美国橡树混交林 (*Quercus rubra* 和 *Quercus prinus*) 土壤硝态氮、净硝化潜力和 N_2O 排放显著降低,而土壤铵态氮和无机氮含量升高,添加硝酸铵的土壤对干湿交替的适应能力明显增强。马钢^[71]研究表明,高寒草甸土壤铵态氮损失速度随着干湿交替过程中干旱程度加大而加快,适宜含水量有利于硝化作用,添加硝酸铵显著提高高寒草甸土壤 N_2O 排放,施氮并且经历干湿交替则降低 N_2O 排放。上述研究表明,降水与温度、降水与氮沉降交互作用对土壤氮循环的影响均与降水变化类型有关,针对不同地区的降水变化特点科学合理的设计降水实验,对于揭示降水与其他因子的交互作用十分重要。

5 结语与展望

随着全球降水格局发生变化,研究降水变化对土壤氮循环的影响,对在全球气候变化下科学经营和管理生态系统养分循环,维持生态系统健康和稳定性具有重要意义。基于目前的研究综述,土壤氮循环对降水变化的响应研究主要存在 3 方面不足:野外降水控制实验观测时间较短、碳氮磷水耦合过程及其作用机制研究不够深入、不同生态系统的多因子交互作用研究相对缺乏,今后应重点开展以下 3 方面研究:

(1) 加强长期固定降水控制实验。与温度连续性变化不同,降水变化更加复杂,各地区降雨量、强度和频率呈现不同特点,陆地生态系统对降水的响应是一个长期过程,然而大部分野外控制实验时间小于 10 年,因此延长观测时间,根据长期数据完善模型提高预测陆地生态系统对降水响应的准确性^[26]。

(2) 重视植物-土壤-大气体系中碳氮磷水耦合机制研究。在陆地生态系统中碳氮磷水存在耦合效应^[72],降水通过改变土壤氮循环间接影响陆地生态系统的固碳能力,而碳氮磷循环在干旱条件下易发生解耦合^[7],其作用机制尚不清楚,特别是森林生态系统,因此加强这方面研究为相关模型验证提供数据支撑。

(3) 开展不同生态系统多因子交互作用研究。以往大多数研究只考虑了降水、温度、氮沉降和 CO_2 等单一因素,忽略了两个及以上因素的交互作用对土壤氮循环的影响^[25],造成结果高估,因而开展两个以上气象因子交互作用研究,并针对不同地区的降水变化特点进行合理的实验设计,有助于提高人们对于生态系统对气候变化响应机制的认识。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Watanabe M D B, Ortega E. Ecosystem services and biogeochemical cycles on a global scale: valuation of water, carbon and nitrogen processes. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14(6): 594-604.
- [3] Gundersen P. Nitrogen deposition and the forest nitrogen cycle: role of denitrification. *Forest Ecology and Management*, 1991, 44(1): 15-28.
- [4] 谢腾芳, 薛立, 王相娥. 土壤-植物-大气连续体系中氮的研究进展. *生态学杂志*, 2009, 28(10): 2107-2116.
- [5] 范跃新, 谢麟, 陈仕东, 郭剑芬, 杨智杰, 钟小剑, 钟羡芳, 徐玲琳. 温度和湿度对武夷山不同海拔土壤微生物氮的影响. *亚热带资源与环境学报*, 2015, 10(2): 9-15.
- [6] Barré P, Durand H, Chenu C, Meunier P, Montagne D, Castel G, Billiou D, Soucémariadin L, Cécillon L. Geological control of soil organic carbon and nitrogen stocks at the landscape scale. *Geoderma*, 2017, 285: 50-56.
- [7] Zhang B W, Tan X R, Wang S S, Chen M L, Chen S P, Ren T T, Xia J Y, Bai Y F, Huang J H, Han X G. Asymmetric sensitivity of ecosystem carbon and water processes in response to precipitation change in a semi-arid steppe. *Functional Ecology*, 2017, 31(6): 1301-1311.
- [8] 张文文, 肖晗冉, 杨宝玲, 董可嘉, 阮宏华, 郑阿宝, 沈彩芹, 曹国华. 不同土地利用类型土壤动物对土壤氮矿化季节变化的影响. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2016, 40(6): 20-26.
- [9] Turner S, Meyer-Stüve S, Schippers A, Guggenberger G, Schaarschmidt F, Wild B, Richter A, Dohrmann R, Mikutta R. Microbial utilization of mineral-associated nitrogen in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 104: 185-196.
- [10] Zhao N N, Li X G. Effects of aspect-vegetation complex on soil nitrogen mineralization and microbial activity on the Tibetan Plateau. *CATENA*, 2017, 155: 1-9.
- [11] Pandey C B, Singh G B, Singh S K, Singh R K. Soil nitrogen and microbial biomass carbon dynamics in native forests and derived agricultural land uses in a humid tropical climate of India. *Plant and Soil*, 2010, 333(1): 453-467.

- [12] 马芬, 马红亮, 邱泓, 杨红玉. 水分状况与不同形态氮添加对亚热带森林土壤氮素净转化速率及 N_2O 排放的影响. 应用生态学报, 2015, 26(2): 379-387.
- [13] 王洪媛, 盖霞普, 翟丽梅, 刘宏斌. 生物炭对土壤氮循环的影响研究进展. 生态学报, 2016, 36(19): 5998-6011.
- [14] Bai S H, Dempsey R, Reverchon F, Blumfield T J, Ryan S, Cernusak L A. Effects of forest thinning on soil-plant carbon and nitrogen dynamics. Plant and Soil, 2017, 411(1/2): 437-449.
- [15] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉, 唐建维. 森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展. 生态学报, 2001, 21(7): 1187-1195.
- [16] 唐国勇, 黄道友, 童成立, 张文菊, 吴金水. 土壤氮素循环模型及其模拟研究进展. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2208-2212.
- [17] Cheng Y, Cai Z C, Zhang J B, Lang M, Mary B, Chang S X. Soil moisture effects on gross nitrification differ between adjacent grassland and forested soils in central Alberta, Canada. Plant and Soil, 2012, 352(1/2): 289-301.
- [18] Bonal D, Burban B, Stahl C, Wagner F, Hérault B. The response of tropical rainforests to drought - lessons from recent research and future prospects. Annals of Forest Science, 2016, 73(1): 27-44.
- [19] Hoepfner S S, Dukes J S. Interactive responses of old-field plant growth and composition to warming and precipitation. Global Change Biology, 2012, 18(5): 1754-1768.
- [20] Nielsen U N, Ball B A. Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems. Global Change Biology, 2015, 21(4): 1407-1421.
- [21] Smith N G, Rodgers V L, Brzostek E R, Kulmatiski A, Avolio M L, Hoover D L, Koerner S E, Grant K, Jentsch A, Fatichi S, Niyogi D. Toward a better integration of biological data from precipitation manipulation experiments into Earth system models. Reviews of Geophysics, 2014, 52(3): 412-434.
- [22] Anderegg L D L, Anderegg W R L, Berry J A. Not all droughts are created equal: translating meteorological drought into woody plant mortality. Tree Physiology, 2013, 33(7): 672-683.
- [23] Hoover D L, Wilcox K R, Young K E. Experimental droughts with rainout shelters: a methodological review. Ecosphere, 2018, 9(1): e02088.
- [24] 张威, 张旭东, 何红波, 解宏图, 白震. 干湿交替条件下土壤氮素转化及其影响研究进展. 生态学杂志, 2010, 29(4): 783-789.
- [25] Wu Z T, Dijkstra P, Koch G W, Peñuelas J, Hungate B A. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. Global Change Biology, 2011, 17(2): 927-942.
- [26] Beier C, Beierkuhnlein C, Wohlgemuth T, Penuelas J, Emmett B, Körner C, de Boeck H, Christensen J H, Leuzinger S, Janssens I A, Hansen K. Precipitation manipulation experiments - challenges and recommendations for the future. Ecology Letters, 2012, 15(8): 899-911.
- [27] Zelikova T J, Housman D C, Grote E E, Neher D A, Belnap J. Warming and increased precipitation frequency on the Colorado Plateau: implications for biological soil crusts and soil processes. Plant and Soil, 2012, 355(1/2): 265-282.
- [28] Chou C, Tu J Y, Tan P H. Asymmetry of tropical precipitation change under global warming. Geophysical Research Letters, 2007, 34(17): L17708.
- [29] 丁一汇. 中国的气候变化及其预测. 北京: 气象出版社, 2016.
- [30] Ma S M, Zhou T J, Dai A G, Han Z Y. Observed changes in the distributions of daily precipitation frequency and amount over China from 1960 to 2013. Journal of Climate, 2015, 28(17): 6960-6978.
- [31] 张学珍, 李侠祥, 徐新创, 张丽娟. 基于模式优选的 21 世纪中国气候变化情景集合预估. 地理学报, 2017, 72(9): 1555-1568.
- [32] 刘珂, 姜大膀. RCP4.5 情景下中国未来干湿变化预估. 大气科学, 2015, 39(3): 489-502.
- [33] Schaeffer S M, Sharp E, Schimel J P, Welker J M. Soil-plant N processes in a High Arctic ecosystem, NW Greenland are altered by long-term experimental warming and higher rainfall. Global Change Biology, 2013, 19(11): 3529-3539.
- [34] 王淑平, 周广胜, 高素华, 郭建平. 中国东北样带土壤氮的分布特征及其对气候变化的响应. 应用生态学报, 2005, 16(2): 279-283.
- [35] Gómez-Rey M X, Madeira M, Gonzalez-Prieto S J, Coutinho J. Soil C and N dynamics within a precipitation gradient in Mediterranean Eucalypt plantations. Plant and Soil, 2010, 336(1/2): 157-171.
- [36] Gharahi Ghehi N, Werner C, Cizungu Ntaboba L, Mbonigaba Muhinda J J, Van Ranst E, Butterbach-Bahl K, Kiese R, Boeckx P. Spatial variations of nitrogen trace gas emissions from tropical mountain forests in Nyungwe, Rwanda. Biogeosciences, 2012, 9(4): 1451-1463.
- [37] Porporato A, D'Odorico P, Laio F, Rodriguez-Iturbe I. Hydrologic controls on soil carbon and nitrogen cycles. I. Modeling scheme. Advances in Water Resources, 2003, 26(1): 45-58.
- [38] Rubol S, Manzoni S, Bellin A, Porporato A. Modeling soil moisture and oxygen effects on soil biogeochemical cycles including dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA). Advances in Water Resources, 2013, 62: 106-124.
- [39] Ouyang W, Xu X T, Hao Z C, Gao X. Effects of soil moisture content on upland nitrogen loss. Journal of Hydrology, 2017, 546: 71-80.
- [40] Liu D W, Zhu W X, Wang X B, Pan Y P, Wang C, Xi D, Bai E, Wang Y S, Han X G, Fang Y T. Abiotic versus biotic controls on soil nitrogen cycling in drylands along a 3200 km transect. Biogeosciences, 2017, 14(4): 989-1001.

- [41] Cregger M A, McDowell N G, Pangle R E, Pockman W T, Classen A T. The impact of precipitation change on nitrogen cycling in a semi - arid ecosystem. *Functional Ecology*, 2014, 28(6): 1534-1544.
- [42] 菊花, 申国珍, 徐文婷, 赵常明, 苏磊, 王杨, 谢宗强, 张秋良. 神农架主要森林土壤 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 排放对降水减少的响应. *生态学报*, 2016, 36(20): 6397-6408.
- [43] Yuste J C, Fernandez-Gonzalez A J, Fernandez-Lopez M, Ogaya R, Penuelas J, Sardans J, Lloret F. Strong functional stability of soil microbial communities under semiarid Mediterranean conditions and subjected to long-term shifts in baseline precipitation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 69: 223-233.
- [44] Felsmann K, Baudis M, Gimbel K, Kayler Z E, Ellerbrock R, Bruchlheid H, Bruckhoff J, Welk E, Puhlmann H, Weiler M, Gessler A, Ulrich A. Soil bacterial community structure responses to precipitation reduction and forest management in forest ecosystems across Germany. *PLoS One*, 2015, 10(4): e0122539.
- [45] Jongen M, Lecomte X, Unger S, Fangueiro D, Pereira J S. Precipitation variability does not affect soil respiration and nitrogen dynamics in the understorey of a Mediterranean oak woodland. *Plant and Soil*, 2013, 372(1/2): 235-251.
- [46] Auyeung D S N, Suseela V, Dukes J S. Warming and drought reduce temperature sensitivity of nitrogen transformations. *Global Change Biology*, 2013, 19(2): 662-676.
- [47] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, Belnap J, Porporato A, Norton U, Ravetta D A, Schaeffer S M. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 221-235.
- [48] Landesman W J, Dighton J. Response of soil microbial communities and the production of plant-available nitrogen to a two-year rainfall manipulation in the New Jersey Pinelands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1751-1758.
- [49] Bell C W, Tissue D T, Loik M E, Wallenstein M D, Acosta-Martinez V, Erickson R A, Zak J C. Soil microbial and nutrient responses to 7 years of seasonally altered precipitation in a Chihuahuan Desert grassland. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1657-1673.
- [50] Schwalm C R, Anderegg W R L, Michalak A M, Fisher J B, Biondi F, Koch G, Litvak M, Ogle K, Shaw J D, Wolf A, Huntzinger D N, Schaefer K, Cook R, Wei Y X, Fang Y Y, Hayes D, Huang M Y, Jain A, Tian H Q. Global patterns of drought recovery. *Nature*, 2017, 548(7666): 202-205.
- [51] Itoh M, Kosugi Y, Takanashi S, Kanemitsu S, Osaka K, Hayashi Y, Tani M, Nik A R. Effects of soil water status on the spatial variation of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes in tropical rain-forest soils in Peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Ecology*, 2012, 28(6): 557-570.
- [52] Wood T E, Silver W L. Strong spatial variability in trace gas dynamics following experimental drought in a humid tropical forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(3): GB3005.
- [53] Meier I C, Leuschner C, Marini E, Fender A C. Species-specific effects of temperate trees on greenhouse gas exchange of forest soil are diminished by drought. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 95: 122-134.
- [54] Evans S E, Burke I C. Carbon and nitrogen decoupling under an 11-Year drought in the shortgrass steppe. *Ecosystems*, 2013, 16(1): 20-33.
- [55] Fry E L, Manning P, Power S A. Ecosystem functions are resistant to extreme changes to rainfall regimes in a mesotrophic grassland. *Plant and Soil*, 2014, 381(1/2): 351-365.
- [56] Dijkstra F A, He M Z, Johansen M P, Harrison J J, Keitel C. Plant and microbial uptake of nitrogen and phosphorus affected by drought using ^{15}N and ^{32}P tracers. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 82: 135-142.
- [57] Kim D G, Vargas R, Bond-Lamberty B, Turetsky M R. Effects of soil rewetting and thawing on soil gas fluxes: a review of current literature and suggestions for future research. *Biogeosciences*, 2012, 9(7): 2459-2483.
- [58] Tiemann L K, Billings S A. Changes in variability of soil moisture alter microbial community C and N resource use. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1837-1847.
- [59] 范志平, 胡亚林, 黎锦涛, 曾德慧. 干湿交替对半干旱区沙地樟子松人工林土壤 C 和 N 矿化速率影响. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3360-3367.
- [60] Leitner S, Minixhofer P, Inselsbacher E, Keiblinger K M, Zimmermann M, Zechmeister-Boltenstern S. Short-term soil mineral and organic nitrogen fluxes during moderate and severe drying - rewetting events. *Applied Soil Ecology*, 2017, 114: 28-33.
- [61] McDaniel M D, Kaye J P, Kaye M W. Do "hot moments" become hotter under climate change? Soil nitrogen dynamics from a climate manipulation experiment in a post-harvest forest. *Biogeochemistry*, 2014, 121(2): 339-354.
- [62] Brown J R, Blankinship J C, Niboyet A, van Groenigen K J, Dijkstra P, Le Roux X, Leadley P W, Hungate B A. Effects of multiple global change treatments on soil N_2O fluxes. *Biogeochemistry*, 2012, 109(1/3): 85-100.
- [63] Larsen K S, Andresen L C, Beier C, Jonasson S, Albert K R, Ambus P, Arndal M F, Carter M S, Christensen S, Holmstrup M, Ibrom A, Kongstad J, van der Linden L, Maraldo K, Michelsen A, Mikkelsen T N, Pilegaard K, Priemé A, Ro-Poulsen H, Schmidt I K, Selsted M B,

- Stevnbak K. Reduced N cycling in response to elevated CO₂, warming, and drought in a Danish heathland: synthesizing results of the CLIMATE project after two years of treatments. *Global Change Biology*, 2011, 17(5): 1884-1899.
- [64] Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Escolar C, Gallardo A, Ochoa V, Gozalo B, Prado-Comesaña A. Direct and indirect impacts of climate change on microbial and biocrust communities alter the resistance of the N cycle in a semiarid grassland. *Journal of Ecology*, 2014, 102(6): 1592-1605.
- [65] Brzostek E R, Blair J M, Dukes J S, Frey S D, Hobbie S E, Melillo J M, Mitchell R J, Pendall E, Reich P B, Shaver G R, Stefanski A, Tjoelker M G, Finzi A C. The effect of experimental warming and precipitation change on proteolytic enzyme activity: positive feedbacks to nitrogen availability are not universal. *Global Change Biology*, 2012, 18(8): 2617-2625.
- [66] 衡涛, 吴建国, 谢世友, 武美香. 高寒草甸土壤碳和氮及微生物生物量碳和氮对温度与降水量变化的响应. *中国农学通报*, 2011, 27(3): 425-430.
- [67] 武丹丹, 井新, 林笠, 杨新宇, 张振华, 贺金生. 青藏高原高寒草甸土壤无机氮对增温和降水改变的响应. *北京大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(5): 959-966.
- [68] Hartmann A A, Barnard R L, Marhan S, Niklaus P A. Effects of drought and N-fertilization on N cycling in two grassland soils. *Oecologia*, 2013, 171(3): 705-717.
- [69] 李轶凡. 增氮增雨对贝加尔针茅草甸草原土壤氮矿化及土壤理化性质的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2015.
- [70] Morillas L, Durán J, Rodríguez A, Roales J, Gallardo A, Lovett G M, Groffman P M. Nitrogen supply modulates the effect of changes in drying-wetting frequency on soil C and N cycling and greenhouse gas exchange. *Global Change Biology*, 2015, 21(10): 3854-3863.
- [71] 马钢. 高寒草甸生态系统 CO₂ 和 N₂O 排放对土壤干湿交替的响应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.
- [72] Chen B Z, Coops N C. Understanding of coupled terrestrial carbon, nitrogen and water dynamics - an overview. *Sensors*, 2009, 9(11): 8624-8657.