区域C-N-H₂O耦合循环过程及其驱动机制

高扬^{1,2*}, 于贵瑞^{1,2†}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

* 通讯作者, E-mail: gaoyang@igsrr.ac.cn

† 通讯作者, E-mail: yugr@igsrr.ac.cn

收稿日期: 2020-02-03; 收修改稿日期: 2020-03-19; 接受日期: 2020-03-30; 网络版发表日期: 2020-04-22

国家优秀青年科学基金项目(编号: 41922003)和国家自然科学基金项目(批准号: 41871080)资助

摘要 区域C-N-H₂O耦合循环从分子到生态系统层面存在不同的耦合机制, 其通过水文通量的物理化学和生物地球化学耦合过程将陆地和水生生态系统紧密链接, 并影响着流域生态系统的生产力以及大气和下游水体的C、N交换过程. 文章在综合分析区域生态系统尺度的C、N、H₂O循环动态过程相互制约关系的基础上, 揭示区域生态系统C、N、H₂O循环动态过程偶联关系的生态学理论基础, 阐明人类活动影响下区域生态系统C-N-H₂O耦合循环对气候与环境变化的响应与适应, 为全面认识和调控不同尺度生态系统的C、N、H₂O循环相互作用关系及其耦合过程提供了理论基础.

关键词 区域C-N-H₂O, 耦合, C循环, N循环, 水循环, 驱动机制

1 前言

综合开展地表水热平衡和化学元素迁移, 集成分析陆地表层系统的人地耦合关系, 以格局-过程-服务-可持续性研究为纽带, 已经成为综合自然地理学乃至地学的核心领域和方向(傅伯杰, 2014, 2018; 傅伯杰等, 2015); 而陆地表层系统集成研究往往以流域或区域集成方式开展, 耦合格局与过程, 深入探讨流域或区域可持续发展的方向与途径(Gao和Bryan, 2017; Kates, 2011), 其中C、N、H₂O等生源要素循环及其耦合格局与过程对气候变化响应与反馈更是未来地球科学发展的新机遇(National Research Council, 2014). 陆地和水生生态系统的C、N等营养物质循环和水文循环从坡

地到流域再到区域尺度紧密耦合, 而河流水文过程是衔接各尺度的水、碳和营养物质循环过程的主要驱动力和载体(高扬和于贵瑞, 2018), 将影响流域生态系统的生产力以及大气和下游水体的C、N交换过程(Manzoni和Porporato, 2011; Lohse等, 2009).

区域C-N-H₂O耦合循环是陆地和水生生态系统通过水文通量的物理化学过程和生物地球化学过程进行的强耦合, 虽然在陆地和水生生态系统中的生物地球化学循环和水循环之间存在明显差异, 但是在形成这种耦合的基本过程存在相似之处. 因此区域的C、N、H₂O循环并不是彼此孤立的, 而是密切联系、相互耦合的生物地球化学过程. 本文论述了区域尺度生态系统C、N、H₂O循环动态偶联关系的水文生态学基

中文引用格式: 高扬, 于贵瑞. 2020. 区域C-N-H₂O耦合循环过程及其驱动机制. 中国科学: 地球科学, 50: 1195–1205, doi: 10.1360/SSTe-2020-0018

英文引用格式: Gao Y, Yu G. 2020. Regional coupled C-N-H₂O cycle processes and associated driving mechanisms. Science China Earth Sciences, 63: 1227–1236, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9603-8>

础、相关概念和驱动机制, 进而阐明人类活动影响下区域生态系统C-N-H₂O耦合循环对气候与环境变化的响应与适应, 提高我们对区域尺度的水文、生物地球化学及生态动力学机制的理解。

2 区域生态系统C-N-H₂O耦合循环

如图1所示, 从点位尺度-坡面尺度的C、N、H₂O循环主要聚焦土壤-植被-大气的C、N、H₂O交换通量及其生物物理过程, 以及坡面C、N水文(地表径流、壤中流和渗漏流)及其形态转化过程。流域尺度则关注C、N物质交换及其生物地球化学过程导致其在河流-流域输移过程的动力学机制。区域尺度的C-N-H₂O耦合循环动态过程发生在元素间的相互作用, 例如陆地-水生生态系统的C-N耦合、C-H₂O耦合以及从陆地到水体迁移转化的水文与生物地球化学耦合过程及其对气候和环境变化的响应与适应(图1)。

流域生态系统是水生和陆地生态系统组成的复合

生态系统, 流域尺度的C、N、H₂O循环是区域C-N-H₂O耦合循环研究的基本单元和子系统, 而区域C-N-H₂O耦合循环则是大气、陆地、淡水、河口和海洋系统形成了一个连续体, 由若干流域子系统组成的物质和能量的流动, 通过水、气体和气溶胶通量进行的物理连接(图1)(高扬和于贵瑞, 2018)。区域C-N-H₂O耦合循环强调C、N、H₂O在垂直-水平的耦合过程, 突出整个系统在气候和环境变化下在大气-陆地、陆地-河流以及河口-海洋的时间-空间的耦合过程。

区域C、N、H₂O循环在不同的时间尺度上发生耦合, C-N-H₂O耦合过程也随时间尺度存在偶联变异性(于贵瑞等, 2013), 例如溶解有机碳的日循环与白天和黑夜的净异养、净自养活动的变化平衡相关, 这可能影响N、P的摄取和释放(Halliday等, 2012)。基流和暴雨径流条件下营养元素的生物地球化学过程发生了动态变化、季节性变化、甚至更长的时间尺度(十年、世纪)释放过去保留及储存的营养元素(Halliday等, 2012; Neal等, 2012)。区域C、N、H₂O循环在空间

图1 区域C-N-H₂O耦合循环过程机理与评估

尺度上也发生了耦合, 其水文过程作为从大气到陆地-海洋的连续体对研究C-N-H₂O耦合变异性有重要的意义(Manzoni和Porporato, 2011). 人类活动将加速或改变区域C-N-H₂O耦合循环所并产生一系列生态与环境问题, 包括区域陆地生态系统退化、水生态系统的酸化、湖泊和近海水体的富营养化、全球变化对人类健康和生物多样性的影响等(Gao等, 2013a, 2013b, 2015).

2.1 区域C-N-H₂O迁移转化过程

泥沙和颗粒、溶解态C、N的输送过程发生在除地下水外的局部地区和区域尺度, 大多数输送随空间尺度和时间尺度不断变化, 如点源和地表径流的日变化. 人类活动造成N的输送量急剧增加, 但C的输送量却变化较小, 其中进入河流的外来C包括了大木材到细小的颗粒有机碳, 它可能来自沉积岩循环的老碳和最近固定的新碳(Blair等, 2004), 也可能来自当地被破坏或运移到下游的C(Bauer等, 2013).

输入到河流、湖泊或水库的C包括从上游输送的颗粒有机碳(POC)和当地产生的生物量, 同时也包括河流C输送过程中发生的颗粒态、溶解态和气态之间的各种转变(Gao等, 2016). 气候、水文、地质和生物等因素都能影响POC和其氧化剂的输入(推动POC的转换和储存)(Blair等, 2004), 环境因子的变化导致了POC组成和储存机制发生变化. 不同的泥沙产生过程即山坡泥沙输送、沟壑形成、质量运移和河岸侵蚀, 其相对贡献存在很大的不确定性(Syvitski等, 2005). 溶解性有机碳(DOC)通过土壤和含水层运移是C运移和土壤有机质形成的一个重要过程. 在某些情况下, DOC通量能对陆地生态系统的C平衡起到重要作用, 因为在大多数生态系统中, DOC是碳和养分从陆地到水生生态系统的转移的重要载体(Gao等, 2017). 由于缺乏对控制DOC动态过程的全面理解, 其可能从局部地区到区域尺度在浅层含水层发生了运输、风化和滞留过程, 同时水和溶质也可在深层含水层中远距离运输, 而地下水的运移时间可能从不到一年到几百万年变化, 运移距离可能会从少于100m到超过1000km范围内变化(Ingebritsen等, 2006; 高扬和于贵瑞, 2018). 河岸带由于其养分和泥沙的保留能力(Ranalli和Macalady, 2010), 有可能将C封存在氧气供应受水流限制的地方, 从而阻碍有机质的有氧分解(Bauer等, 2013).

流域N流失是一个连续的动态过程, 包括土壤侵

蚀过程、降雨径流过程、地表溶质溶出过程和溶质入渗过程, 这四个过程相互联系相互作用(Casey等, 2001; Song等, 2017). N素多以NH₄⁺-N和NO₃⁻-N形式存在于水中并随径流流失(Moog和Whiting, 2002). 在壤中流发生频繁的紫色土地区, 土壤N以NO₃⁻-N的形式随壤中流迁移(Gao等, 2014a); 而由于NH₄⁺-N带正电荷, 土壤对其吸附能力较强, 使得NH₄⁺-N不易随溶质迁移, 故其流失量较小. 坡面土壤N素迁移转化的主要途径为: 硝态氮的淋溶、有机态氮素随径流沉积在坡面下部, 并吸附于泥沙颗粒表面而随径流和泥沙流出(Song等, 2017). 从坡地输送到流域生态系统中的活性N, 有24%可通过河道迁移输出流域, 而在剩余76%的活性N中有大约25%积累在土壤表层、储存在生物体或随着木材砍伐等输出流域, 剩下的部分则通过反硝化作用重新进入大气(van Breemen等, 2002).

Howarth等(2006)认为, 自然气候通过调节N素输出方式, 使河流N输出(RNF)与人类活动净氮输入(NANI)发生变化, 如当降雨量和河流径流量较大时, 径流在湿地、湖泊和河道中停留时间将变短; 反硝化作用的量又与径流停留时间密切相关, 因此反硝化作用被减弱, 使得RNF/NANI更高. RNF/NANI受气候、下垫面、植被覆盖等多重综合因素的共同影响(Seitzinger等, 2006, 2002). 此外, 径流系数是可较好表征降雨径流驱动指标, 尽管诸多流域气候条件、降雨量、下垫面等差距很大, 但径流系数与N素输出的相关性极显著, 而降雨量、径流量与氮素输出比的相关性不显著(张汪寿等, 2014). 不同形式的N、P转化发生在下游运输, 这取决于停留时间, 其在湖泊和河流之间存在根本区别(Edwards和Withers, 2008). 虽然土地管理本身可以影响流量和路径, 但是流量更大时, 相比来源压力或土地管理, 水文过程是N、P浓度一个更重要的驱动因素(Jordan等, 2012).

2.2 区域C-N-H₂O生物地球化学过程

湿地、湖泊和人工水库在河网C-N-H₂O生物地球化学过程中发挥重要作用(Jordan等, 2011; Harrison等, 2009). 植物生物量的临时储存、泥沙和颗粒C、N和P(Beusen等, 2005)、反硝化过程(Harrison等, 2009)以及泥沙和水体之间溶解性NP交换(Brett和Benjamin, 2008)都会导致湖泊和水库中的泥沙、碳和养分滞留;

与C循环相关和并行的生物地球化学过程包括藻类生长、死亡、沉积和分解、有机化合物的矿化、矿物颗粒P的吸附/解吸和反硝化过程(图2)。潜流带通常被定义为地表水和地下水混合的冲积含水层的一部分, 而河流与潜流带之间的水文交换是泥沙中产物进行生物地球化学活动的运输介质(Gooseff, 2010)。地表水混进泥沙将物质带到潜流带, 从而发生生物地球化学转化, 并以某种改变的形态返回地表水(Boulton等, 2010; Bardini等, 2012)。

我们对地表水和地下水交界处研究较少, 尤其上涌地下水对生物地球化学转化的作用(Krause等, 2009)。地表水中初级生产力往往是由养分富集导致的, 相反, 渗入地表水供应了有机物、溶解氧、无脊椎动物和微生物可以提高潜流带的生产力(Boulton等, 2010)。河岸带缓冲区中的反硝化作用通常被认为是将NO₃⁻从地下径流和地下水中清除的主要过程(Hefting等, 2003)(图2)。对地表径流中的泥沙过滤以及地下径流中的植物吸收是这些区域中P和NH₄⁺滞留的主要过程(Doriotz等, 2006; Hoffmann等, 2009)。当地下水沿河道从高处流向土壤表层以1~3m的不透水或低渗透土层时, 河岸带的这种过滤能力是最大的(Hill, 1996); 在这种情况下, 养分和地下水先流经河岸带的生物活性表土, 然后到达河流(Vidon和Hill, 2004; Seitzinger

等, 2010)。

2.3 陆地-大气界面的C、N交互作用

C循环同时与其他元素的生物地球化学循环相耦合, 如来自泥炭的甲烷产生受到硫酸盐和硝酸盐沉降的抑制(Watson和Nedwell, 1998), 随着N、S沉降降低, 来自湿地的甲烷排放量因此而增加。在湖泊中的甲烷排放受到C、N、P、S、Fe和Mn循环之间的相互作用的影响(Moss, 2012)。在欧洲和北美, S沉降减少增加了DOC在河流中的输出(Evans等, 2005)。大气中的N、S耦合循环导致了区域沉降发生巨大变化, 这反过来又对流域、河流到河口和海洋环境的N输出产生影响(Gao等, 2018)。Àvila和Rodà(2012)研究地中海流域发现, 25年来硫酸盐沉降减少增加了流域河水中的碱度; 流域保留了大部分的大气N沉降, 使得排入河流中的硝酸盐浓度缓慢增加(Jarvie等, 2012)。对于贫N地区, N沉降可能是植物生长的主要N源, 如大气N沉降与矿化N有很好的相关性, 表明它是这些系统中N的主要来源(Rowe等, 2012)。上述例子突出了C、N生物地球化学循环的相互联系程度, 甚至考虑到大气层和其他环境之间的相互关系, 说明对未来耦合研究预测准确性的难度。

全球CO₂逃逸量为2.1Pg C a⁻¹, 河流是流域水体与

图2 区域C-N-H₂O循环的物理化学和生物地球化学耦合过程

大气之间 CO_2 交换的热点地区, 其面积虽然只占陆地水域面积的20%, 但却产生了大约70%的 CO_2 通量(Raymond等, 2013). 全球每年从河流中逃逸的 CO_2 量为 1.8Pg C a^{-1} , 大约70%的 CO_2 逃逸源自仅占陆地面积约20%的水体; 湖泊和水库的全球 CO_2 逃逸量为 0.32Pg C a^{-1} ; 在高纬度和热带地区的湖泊和水库C排放通量较大, 大约50%的排放来自全球最大的湖泊, 其中占据全球湖泊面积2.4%的湖泊却排放了34%的 CO_2 (Raymond等, 2013). 此外, N沉降对陆地C源汇的影响呈现不同结果, 部分研究认为N沉降增加了陆地生态系统C汇, 尤其N沉降对欧洲森林固C的贡献巨大(Magnani等, 2007); 另外一个观点认为N沉降促进土壤中的C释放, 尤其在南美热带雨林(Cleveland和Townsend, 2006; Bragazza等, 2006), 但N沉降对温带森林的C截存影响不大, 这取决于土壤的N饱和状态(Högberg, 2007).

2.4 陆地-淡水界面C、N交换的相互作用

无论对陆地(作物生产)产生的正面影响, 还是对淡水(藻类生长)产生的负面影响, 增加N和P的生物可利用性都可以共同促进初级生产力, 而不是元素的单独作用(Vitousek等, 2010; Harpole等, 2011); 反过来, N和P输入刺激微生物活动和C循环变化, 例如微生物在水生环境中快速利用不同形态C的机制(Dawson等, 2012). 河岸区和潜流带是养分交换和通量转化的关键区域(Trimmer等, 2012), 陆地C的同化潜力取决于养分供应、水的可利用性和光照, 而淡水中的C更受到滞留时间和光照的影响(Jarvie等, 2012). 因此, 通过河网进入海洋的养分循环速率和通量主要取决于通过物理(如侵蚀)和化学(如淋溶)过程的时间而不是生物过程(Vitousek等, 2010; Quinton等, 2010). 河网入海的养分循环进一步加大了营养元素在陆-水界面上的反应性、损失过程和通量之间的差异, 并对陆-水界面C循环和输移产生了影响(Gao等, 2012), 这构成区域尺度C-N- H_2O 耦合循环的理论基础(Gao等, 2013a)(图2).

河流不是一个简单的被动运输系统, 而是在陆地和河口/海洋环境之间充当“反应管道”(Jarvie等, 2012). Trimmer等(2012)认为虽然河流进行广泛的C、N代谢, 但低估了河流在全球C、N循环中的重要性. Moss(2012)提出养分的可用性和气候变化对流域中营养元素的储存和滞留的影响. Gao等(2015)评估揭示了

中国河流的NP输入导致南海C汇年增加量为 15.1Tg C , 占近海的比重为69.68%; 中国近海的年C汇量为 65.06Tg C , 因此通过河流C-N- H_2O 耦合作用产生的C汇量占了近四分之一.

3 环境变化对区域C-N- H_2O 耦合过程的影响机制

3.1 气候变化对区域C-N- H_2O 耦合变异性的影响

大气、淡水、河口和海洋连续体之间的C、N、P循环的相互作用是划分不同生物圈C存储区的整体(Aufdenkampe等, 2011; Finzi等, 2011), 而气候变化对区域C-N- H_2O 的影响包括养分循环、初级生产力、微生物活动和非生物过程(Gao等, 2013b, 2014b). 虽然海洋在长期调节C和提供气候反馈方面起着关键作用, 但是沿海和河口生态系统的气候反馈引起越来越多的关注(Matear等, 2010; Statham, 2012), 这主要由于水生和陆地环境有很大的潜力减缓或扩大气候变化(Finzi等, 2011; Trimmer等, 2012). CO_2 浓度升高总体上提高了植被净初级生产力, 并影响植物的生长、物种入侵及碳氮周转速度, 并与其他胁迫因子、水分可利用性产生明显的交互作用(Smith等, 2000; Zhang等, 2019); 同时 CO_2 富集显著影响土壤碳氮转化和碳氮气体排放通量, 对土壤碳储量的影响随N增加而增加, 与其他养分元素也有协同效应(Liu等, 2018).

通过增温控制实验发现, 与总光合作用相比, 群落呼吸的增加暗示由于气候变暖导致的净异养活动增加, 这有可能活化滞留、储存的营养元素, 导致 CO_2 和 N_2O 潜在的释放(Moss, 2012). 此外, 提高生产力导致有机C的不稳定, 更易促进呼吸代谢产生 CO_2 , 这将增加通过 CO_2 从淡水中逃逸到大气中C的损失, 而不是通过沉积物增加有机C的存贮(Dawson等, 2012). 最初陆地环境中产生的大部分 CO_2 首先淋溶进入河流, 然后脱气进入河口和海洋(Aufdenkampe等, 2011), 随着气候变暖和C移动性增加提高了水生系统的反硝化作用, 这可能会由于增加N的固定而抵消(Gao等, 2020).

增加N固定和N沉积可以改变陆地和某些水生系统中的养分限制, 从N限制转变到P限制, 从而可能对生物圈吸收 CO_2 能力起到关键作用, 导致陆地-河口连续体发生相同的环境反应(Gao等, 2019a, 2020). 在海洋中, 生态系统呼吸(ER)与总初级生产力(GPP)紧密相

连, 而淡水中来自陆地的外来有机物质燃料代谢远远超出了本地生产的有机物质(Jarvie等, 2012); ER对全球变暖的反应比GPP更迅速, 这表明淡水在气候变暖条件下有加速大气CO₂净来源的潜力(Song等, 2018).

3.2 区域N沉降过程及其对C-N耦合循环的影响

人为大气N排放导致的Nr沉降对陆地和水生生态系统的环境营养输入增加, 从而使流域系统生产力发生变化并产生相应的环境效应(Gao等, 2019a, 2019b). Nr沉降输入可以影响光合作用而增加生物对大气中CO₂的吸收(Luo等, 2006; Gao等, 2013b), 这将刺激C初级生产并提高水生生态系统的CO₂吸收和N₂O排放(Mcleod等, 2011; Marotta等, 2012)(图3). 陆地生态系统中Nr沉降的增加将影响水生生态系统的水质, 这一进程主要依靠陆-水交界处的N循环(图3). 反硝化被认为是驱动陆地生态系统N转移的主要机制, 这会导致N的净损失, 但有助于长期有效保护水质(Gao等, 2019a, 2019b); 如果反硝化作用不能一直到产生N₂, 水质的改善与N₂O排放对大气造成的负面影响是相互抵消的(Niu等, 2016). C、N循环之间通过生物学、物理学和化学过程的耦合机制协同决定着生态系统的结构和功能状态(Gao等, 2014b). 伴随着温室气体CO₂浓度的升高, N也会以N沉降的形式进入到水生生态系统中, 加速水生生态系统中的C、N耦合循环(Cleveland和

Townsend, 2006; Bragazza等, 2006).

Gao等(2013b, 2014b)认为由于C、N耦合关系, 生态系统中N循环存在健康阈值的平衡点, 例如当森林生态系统超过N饱和和极限的阈值时, 有效N将超过微生物和植物的需求, 导致N淋溶. Fleischer等(2013)还报道, 在大气N沉降增加的条件下, 将达到北方温带常绿林8kg N ha⁻¹ a⁻¹的光合阈值. 过量的N会导致树木营养的失衡、破坏N的新陈代谢、降低净光合和抑制植物生长(Law, 2013; He等, 2018). Nr沉降可以改变物种多样性(Gao等, 2014b), 提高森林生态系统的酸化能力, 降低土壤的缓冲能力(Gao等, 2019b). Nr气体和气溶胶对地上植物生长和生理有直接的毒性(McLau-chlan等, 2013), 其中增加NH₃和NH₄⁺生物可利用性会对生长在以NO₃⁻为主环境中的敏感植物物种产生毒害作用, 并且导致根和芽生长不良(Liu等, 2013).

虽然过量的Nr沉降通常会对生态系统产生负面影响, 但是N沉降也可以有利于受N限制的陆地和水生生态系统(Law, 2013; Gao等, 2014b). 陆地生态系统的N累积是通过驱动竞争性相互作用进而改变不同生态系统物种组成的主要动力(Bobbink等, 2010). 活性Nr沉降会影响森林土壤地下N的储存状态, 也会导致土壤可利用N含量的增加(Norby等, 2010; 汪亚及等, 2019). 在N限制的森林生态系统, N沉降会满足植被对N的需求, 但随着光合能力的提高和对植物生长的刺激作用

图3 N沉降对流域C、N耦合循环影响机制

改变植被的营养状况(Xu等, 2009).

随着Nr沉降的增加, 导致水体酸化, 初级生产者的发展、维持和扩散将导致水生生态系统的富营养化, 而N污染的直接毒性会损害水生动物的生存、生长和繁殖能力(滕涌和周启星, 2018; Yu等, 2019). 这些过程由N输入控制, 因为通过淋溶作用进入到水体的N和浮游生物N的固定速率都相对较低, 而沉降层的微生物主动释放N到大气中(Jia等, 2020). 此外, 大气Nr沉降会促进水体C生产力, 特别是在贫营养的水生生态系统中(Gao等, 2019b). 过量Nr沉降可能会产生相反的效果, 例如, N的增加大于系统中后续浮游植物生产和吸收能力的增加, 以及 $p\text{CO}_2$ 分压的增加使得C汇功能减弱, 浮游生物的内部竞争和组成结构会受到N沉降在内的N输入的影响(Jia等, 2019, 2020). 在大多数水体中, P不仅控制富营养化, 而且限制藻类和水生植物的初级生产(Scheffer等, 2001; Carstensen等, 2011), 但N源和N:P对有毒水华相关藻类具有较大的控制作用(Gao等, 2019b; Cai等, 2009).

4 结语

区域生态系统C-N- H_2O 耦合循环从分子层面到生态系统层面存在不同的耦合机制, 要想深入了解生态系统各因素对C-N- H_2O 耦合关系的制约, 首先要了解C-N- H_2O 耦合关系的生理学基础以及生态学机制. 未来的区域生态系统C-N- H_2O 耦合循环研究将更加强调以人地系统关系为研究核心, 耦合土壤、水文、大气等多要素开展研究, 强调人类活动影响下的自然地理过程, 特别是C-N- H_2O 耦合循环的格局与过程, 不仅能够揭示全球变化背景下陆地表层系统响应的多尺度特征, 同时也能够为深化陆地表层系统的综合研究、拓展圈层界面过程研究以及耦合物理、化学与生物过程提供支撑.

流域生态系统的C、N循环既是区域生态系统的最为重要的物质循环过程, 又是能量传输和养分循环的载体, 二者之间通过资源供给与需求计量平衡关系、资源利用与转化的生物制约关系, 以及生物学、物理学和化学过程的耦合机制而相互依赖、相互制约、联动循环, 协同决定着生态系统的结构和功能状态, 决定着生态系统提供物质生产、资源更新、环境净化以及生物圈的生命维持等生态服务的能力和强

度. 未来区域研究手段将更加强调“天地空一体化”相结合, 关注多种环境因子的交互作用对生态系统过程和功能的综合影响, 明确短期响应与长期适应的规律, 研究陆地-河流-海洋生态系统内关键生物、生态系统C、N、 H_2O 循环等关键生态学和生物学过程对全球变化的响应, 解析极端气候对区域C-N- H_2O 耦合循环的触发、影响和生态系统的反馈机制, 以及深入揭示C-N- H_2O 耦合格局背后的环境控制机制和生物驱动机制. 此外, 需要进一步加强大气N沉降对区域C-N- H_2O 耦合循环过程的影响研究, 尤其关于大气N沉降对生态系统生物环境因子、植被结构、生物多样性以及土壤和水体环境的影响, 以及其与环境因子共同限制湖泊等水体碳循环与生产力的生物物理-生物化学机制及其定量评估.

参考文献

- 傅伯杰. 2014. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. 地理科学, 69: 1052–1059
- 傅伯杰. 2018. 新时代自然地理学发展的思考. 地理科学进展, 37: 1–7
- 傅伯杰, 冷疏影, 宋长青. 2015. 新时期地理学的特征与任务. 地理科学, 35: 939–945
- 高扬, 于贵瑞. 2018. 流域生物地球化学循环与水文耦合过程及其控制机制. 地理学报, 73: 1380–1392
- 滕涌, 周启星. 2018. 土壤环境质量基准与水/大气环境质量基准的转换研究. 中国科学: 地球科学, 48: 1466–1477
- 汪亚及, 高磊, 彭新华. 2019. 红壤农田小流域径流组分对氮素流失动态的影响. 中国科学: 地球科学, 49: 1960–1973
- 于贵瑞, 高扬, 王秋凤, 刘世荣, 申卫军. 2013. 陆地生态系统碳-氮-水循环的关键耦合过程及其生物调控机制探讨. 中国生态农业学报, 21: 1–13
- 张汪寿, 李叙勇, 苏静君. 2014. 河流氮输出对流域人类活动净氮输入响应研究综述. 应用生态学报, 25: 272–278
- Aufdenkampe A K, Mayorga E, Raymond P A, Melack J M, Doney S C, Alin S R, Aalto R E, Yoo K. 2011. Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere. *Front Ecol Environ*, 9: 53–60
- Àvila A, Rodà F. 2012. Changes in atmospheric deposition and streamwater chemistry over 25 years in undisturbed catchments in a Mediterranean mountain environment. *Sci Total Environ*, 434: 18–27
- Bardini L, Boano F, Cardenas M B, Revelli R, Ridolfi L. 2012. Nutrient cycling in bedform induced hyporheic zones. *Geochim Cosmochim*

- Acta*, 84: 47–61
- Bauer J E, Cai W J, Raymond P A, Bianchi T S, Hopkinson C S, Regnier P A G. 2013. The changing carbon cycle of the coastal ocean. *Nature*, 504: 61–70
- Beusen A H W, Dekkers A L M, Bouwman A F, Ludwig W, Harrison J. 2005. Estimation of global river transport of sediments and associated particulate C, N and P. *Glob Biogeochem Cycle*, 19: GB4S05
- Blair N E, Leithold E L, Aller R C. 2004. From bedrock to burial: The evolution of particulate organic carbon across coupled watershed-continental margin systems. *Mar Chem*, 92: 141–156
- Bobbink R, Hincks K, Galloway J, Spranger T, Alkemade R, Ashmore M, Bus-tamante M, Cinderby S, Davidson E, Dentener F, Emmett B, Erisman J W, Fenn M, Gilliam F, Nordin A, Pardo L, Vries W D. 2010. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: A synthesis. *Ecol Appl*, 20: 30–59
- Boulton A J, Dattr T, Kasahara T, Mutz M, Stanford J A. 2010. Ecology and management of the hyporheic zone: Stream-ground-water interactions of running waters and their floodplains. *J North Am Benthol Soc*, 29: 26–40
- Bragazza L, Freeman C, Jones T, Rydin H, Limpens J, Fenner N, Ellis T, Gerdol R, Hájek M, Hájek T, Iacumin P, Kutnar L, Tahvanainen T, Toberman H. 2006. Atmospheric nitrogen deposition promotes carbon loss from peat bogs. *Proc Natl Acad Sci USA*, 103: 19386–19389
- van Breemen N, Boyer E W, Goodale C L, Jaworski N A, Paustian K, Seitzinger S P, Lajtha K, Mayer B, van Dam D, Howarth R W, Nadelhoffer K J, Eve M, Billen G. 2002. Where did all the nitrogen go? Fate of nitrogen inputs to large watersheds in the Northeastern U.S.A. *Biogeochemistry*, 57–58: 267–293
- Brett M T, Benjamin M M. 2008. A review and reassessment of lake phosphorus retention and the nutrient loading concept. *Freshwater Biol*, 53: 194–211
- Cai Z P, Huang W W, Duan S S. 2009. Cell proliferation of *Phaeocystis globosa*, a red tide causative marine microalga in various phosphorus (P)- and nitrogen (N)replete conditions. *Ecol Environ Sci*, 18: 447–452
- Carstensen J, Sánchez-Camacho M, Duarte C M, Krause-Jensen D, Marbà N. 2011. Connecting the dots: Responses of coastal ecosystems to changing nutrient concentrations. *Environ Sci Technol*, 45: 9122–9132
- Casey R E, Taylor M D, Klaine S J. 2001. Mechanisms of nutrient attenuation in a subsurface flow riparian wetland. *J Environ Qual*, 30: 1732–1737
- Cleveland C C, Townsend A R. 2006. Nutrient additions to a tropical rain forest drive substantial soil carbon dioxide losses to the atmosphere. *Proc Natl Acad Sci USA*, 103: 10316–10321
- Dawson J J C, Adhikari Y R, Soulsby C, Stutter M I. 2012. The biogeochemical reactivity of suspended particulate matter at nested sites in the Dee basin, NE Scotland. *Sci Total Environ*, 434: 159–170
- Dorioz J M, Wang D, Poulenard J, Trévisan D. 2006. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics—A critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France. *Agric Ecosyst Environ*, 117: 4–21
- Edwards A C, Withers P J A. 2008. Transport and delivery of suspended solids, nitrogen and phosphorus from various sources to freshwaters in the UK. *J Hydrol*, 350: 144–153
- Evans C D, Monteith D T, Cooper D M. 2005. Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: Observations, possible causes and environmental impacts. *Environ Pollution*, 137: 55–71
- Finzi A C, Cole J J, Doney S C, Holland E A, Jackson R B. 2011. Research frontiers in the analysis of coupled biogeochemical cycles. *Front Ecol Environ*, 9: 74–80
- Fleischer K, Rebel K T, van der Molen M K, Erisman J W, Wassen M J, van Loon E E, Montagnani L, Gough C M, Herbst M, Janssens I A, Gianelle D, Dolman A J. 2013. The contribution of nitrogen deposition to the photosynthetic capacity of forests. *Biogeochem Cycle*, 27: 187–199
- Gao L, Bryan B A. 2017. Finding pathways to national-scale land-sector sustainability. *Nature*, 544: 217–222
- Gao Y, Hao Z, Han N, Yang J, Tian J, Song X W, Wen X F, He N P. 2019b. Tracking the fate of deposited nitrogen and its redistribution in a subtropical watershed in China. *Ecology*, e2094
- Gao Y, He N P, Wang Q F, Miao C Y. 2013a. Increase of external nutrient input impact on carbon sinks in Chinese coastal seas. *Environ Sci Technol*, 47: 13215–13216
- Gao Y, He N P, Yu G R, Tian J, Miao C Y, Yang T T. 2015. Impact of external nitrogen and phosphorus input between 2006 and 2010 on carbon cycle in China seas. *Reg Environ Change*, 15: 631–641
- Gao Y, He N P, Zhang X Y. 2014b. Effects of reactive nitrogen deposition on terrestrial and aquatic ecosystems. *Ecol Eng*, 70: 312–318
- Gao Y, Jia Y L, Yu G R, He N P, Zhang L, Zhu B, Wang Y F. 2019a. Anthropogenic reactive nitrogen deposition and associated nutrient limitation effect on gross primary productivity in inland water of China. *J Cleaner Production*, 208: 530–540
- Gao Y, Ma M Z, Yang T, Chen W L, Yang T T. 2018. Global atmospheric sulfur deposition and associated impact on nitrogen cycling in ecosystems. *J Cleaner Production*, 195: 1–9
- Gao Y, Yang T T, Wang Y F, Yu G R. 2017. Fate of river-transported carbon in China: Implications for carbon cycling in coastal

- ecosystems. *Ecosyst Health Sustainability*, 3: e01265
- Gao Y, Yu G R, He N P, He H L, Wang Q F, Fang H J. 2012. Is there an existing healthy threshold for carbon storage in the ecosystem? *Environ Sci Technol*, 46: 4687–4688
- Gao Y, Yu G R, He N P. 2013b. Equilibration of the terrestrial water, nitrogen, and carbon cycles: Advocating a health threshold for carbon storage. *Ecol Eng*, 57: 366–374
- Gao Y, Yu G R, Yang T T, Jia Y L, He N P, Zhuang J. 2016. New insight into global blue carbon estimation under human activity in land-sea interaction area: A case study of China. *Earth-Sci Rev*, 159: 36–46
- Gao Y, Zhou F, Ciais P, Miao C Y, Yang T, Jia Y L, Zhou X D, Klaus B, Yang T T, Yu G R. 2020. Human activities aggravate nitrogen-deposition pollution to inland water over China. *Natl Sci Rev*, 7: 430–440
- Gao Y, Zhu B, Yu G R, Chen W L, He N P, Wang T, Miao C Y. 2014a. Coupled effects of biogeochemical and hydrological processes on C, N, and P export during extreme rainfall events in a purple soil watershed in southwestern China. *J Hydrol*, 511: 692–702
- Goosseff M N. 2010. Defining hyporheic zones—Advancing our conceptual and operational definitions of where stream water and groundwater meet. *Geography Compass*, 4: 945–955
- Halliday S J, Wade A J, Skeffington R A, Neal C, Reynolds B, Rowland P, Neal M, Norris D. 2012. An analysis of long-term trends, seasonality and short-term dynamics in water quality data from Plynlimon, Wales. *Sci Total Environ*, 434: 186–200
- Harpole W S, Ngai J T, Cleland E E, Seabloom E W, Borer E T, Bracken M E S, Elser J J, Gruner D S, Hillebrand H, Shurin J B, Smith J E. 2011. Nutrient co-limitation of primary producer communities. *Ecol Lett*, 14: 852–862
- Harrison J A, Maranger R J, Alexander R B, Giblin A E, Jacinthe P A, Mayorga E, Seitzinger S P, Sobota D J, Wollheim W M. 2009. The regional and global significance of nitrogen removal in lakes and reservoirs. *Biogeochemistry*, 93: 143–157
- He B, Huang L, Chen Z Y, Wang H Y. 2018. Weakening sensitivity of global vegetation to long-term droughts. *Sci China Earth Sci*, 61: 60–70
- Hefting M M, Bobbink R, de Caluwe H. 2003. Nitrous oxide emission and denitrification in chronically nitrate-loaded riparian buffer zones. *J Environ Qual*, 32: 1194–1203
- Hill A R. 1996. Nitrate removal in stream riparian zones. *J Environ Qual*, 25: 743–755
- Hoffmann C C, Kjaergaard C, Uusi-Kämpä J, Hansen H C B, Kronvang B. 2009. Phosphorus retention in riparian buffers: Review of their efficiency. *J Environ Qual*, 38: 1942–1955
- Höglberg P. 2007. Nitrogen impacts on forest carbon. *Nature*, 447: 781–782
- Howarth R W, Swaney D P, Boyer E W, Marino R, Jaworski N, Goodale C. 2006. The influence of climate on average nitrogen export from large watersheds in the Northeastern United States. *Biogeochemistry*, 79: 163–186
- Ingebritsen S, Sanford W, Neuzil C. 2006. Groundwater in Geologic Processes. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press
- Jarvie H P, Jickells T D, Skeffington R A, Withers P J A. 2012. Climate change and coupling of macronutrient cycles along the atmospheric, terrestrial, freshwater and estuarine continuum. *Sci Total Environ*, 434: 252–258
- Jia J J, Gao Y, Song X W, Chen S B. 2019. Characteristics of phytoplankton community primary productivity response to the nutrient status of the Poyang Lake-Gan River Basin, China. *Ecohydrology*, 12: e2136
- Jia J J, Gao Y, Zhou F, Shi K, Johnes P, Dungait J A J, Ma M Z, Lu Y. 2020. Identifying the main drivers of change of phytoplankton community structure and gross primary productivity in a river-lake system. *J Hydrol*, 583: 124633
- Jordan P, Melland A R, Mellander P E, Shortle G, Wall D. 2012. The seasonality of phosphorus transfers from land to water: Implications for trophic impacts and policy evaluation. *Sci Total Environ*, 434: 101–109
- Jordan S J, Stoffer J, Nestlerode J A. 2011. Wetlands as sinks for reactive nitrogen at continental and global scales: A meta-analysis. *Ecosystems*, 14: 144–155
- Kates R W. 2011. What kind of a science is sustainability science? *Proc Natl Acad Sci USA*, 108: 19449–19450
- Krause S, Heathwaite L, Binley A, Keenan P. 2009. Nitrate concentration changes at the groundwater-surface water interface of a small cumbrian river. *Hydrol Process*, 23: 2195–2211
- Law B. 2013. Nitrogen deposition and forest carbon. *Nature*, 496: 307–308
- Liu S, Cheng J, Wang C, Chen J, Jin Y, Zou Z, Li S, Niu S, Zou J. 2018. Climatic role of terrestrial ecosystem under elevated CO₂: A bottom-up greenhouse gases budget. *Ecol Lett*, 21: 1108–1118
- 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. 2013. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 494: 459–462
- Lohse K A, Brooks P D, McIntosh J C, Meixner T, Huxman T E. 2009. Interactions between biogeochemistry and hydrologic systems. *Annu Rev Environ Resour*, 34: 65–96
- Luo Y Q, Hui D F, Zhang D Q. 2006. Elevated CO₂ stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: A meta-analysis. *Ecology*, 87: 53–63

- Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M, Berbigier P, Berninger F, Delzon S, Grelle A, Hari P, Jarvis P G, Kolari P, Kowalski A S, Lankreijer H, Law B E, Lindroth A, Loustau D, Manca G, Moncrieff J B, Rayment M, Tedeschi V, Valentini R, Grace J. 2007. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature*, 447: 849–851
- Manzoni S, Porporato A. 2011. Common hydrologic and biogeochemical controls along the soil-stream continuum. *Hydrol Process*, 25: 1355–1360
- Marotta H, Duarte C M, Guimaraes-Souza B A, Enrich-Prast A. 2012. Synergistic control of CO₂ emissions by fish and nutrients in a humic tropical lake. *Oecologia*, 168: 839–847
- Matear R J, Wang Y P, Lenton A. 2010. Land and ocean nutrient and carbon cycle interactions. *Curr Opin Environ Sustainability*, 2: 258–263
- McLauchlan K K, Williams J J, Craine J M, Jeffers E S. 2013. Changes in global nitrogen cycling during the Holocene epoch. *Nature*, 495: 352–355
- McLeod E, Chmura G L, Bouillon S, Salm R, Björk M, Duarte C M, Lovelock C E, Schlesinger W H, Silliman B R. 2011. A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Front Ecol Environ*, 9: 552–560
- Moog D B, Whiting P J. 2002. Climatic and agricultural factors in nutrient exports from two watersheds in Ohio. *J Environ Qual*, 31: 72–83
- Moss B. 2012. Cogs in the endless machine: Lakes, climate change and nutrient cycles: A review. *Sci Total Environ*, 434: 130–142
- National Research Council. 2014. New Research Opportunities in the Earth Sciences. doi: 10.17226/13236
- Neal C, Reynolds B, Rowland P, Norris D, Kirchner J W, Neal M, Sleep D, Lawlor A, Woods C, Thacker S, Guyatt H, Vincent C, Hockenhull K, Wickham H, Harman S, Armstrong L. 2012. High-frequency water quality time series in precipitation and streamflow: From fragmentary signals to scientific challenge. *Sci Total Environ*, 434: 3–12
- Niu S, Classen A T, Dukes J S, Kardol P, Liu L, Luo Y, Rustad L, Sun J, Tang J, Templer P H, Thomas R Q, Tian D, Vicca S, Wang Y P, Xia J, Zaehle S. 2016. Global patterns and substrate-based mechanisms of the terrestrial nitrogen cycle. *Ecol Lett*, 19: 697–709
- Norby R J, Warren J M, Iversen C M, Medlyn B E, McMurtrie R E. 2010. CO₂ enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability. *Proc Natl Acad Sci USA*, 107: 19368–19373
- Quinton J N, Govers G, Van Oost K, Bardgett R D. 2010. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. *Nat Geosci*, 3: 311–314
- Ranalli A J, Macalady D L. 2010. The importance of the riparian zone and in-stream processes in nitrate attenuation in undisturbed and agricultural watersheds—A review of the scientific literature. *J Hydrol*, 389: 406–415
- Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, Sobek S, McDonald C, Hoover M, Butman D, Striegl R, Mayorga E, Humborg C, Kortelainen P, Dürr H, Meybeck M, Ciais P, Guth P. 2013. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, 503: 355–359
- Rowe E C, Emmett B A, Frogbrook Z L, Robinson D A, Hughes S. 2012. Nitrogen deposition and climate effects on soil nitrogen availability: Influences of habitat type and soil characteristics. *Sci Total Environ*, 434: 62–70
- Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, Folke C, Walker B. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413: 591–596
- Seitzinger S, Harrison J A, Böhlke K K, Bouwman A F, Lowrance R, Peterson B, Tobias C, Dreht G V. 2006. Denitrification across landscapes and waterscapes: A synthesis. *Ecol Appl*, 16: 2064–2090
- Seitzinger S P, Mayorga E, Bouwman A F, Kroeze C, Beusen A H W, Billen G, Van Dreht G, Dumont E, Fekete B M, Garnier J, Harrison J, Wisser D, Wollheim W M. 2010. Global river nutrient export: A scenario analysis of past and future trends. *Glob Biogeochem Cycle*, 23
- Seitzinger S P, Styles R V, Boyer E W, Alexander R B, Billen G, Howarth R W, Mayer B, van Breemen N. 2002. Nitrogen retention in rivers: Model development and application to watersheds in the northeastern U.S.A. In: Boyer E, ed. *The Nitrogen Cycle at Regional to Global Scales*. Springer Netherlands
- Smith S D, Huxman T E, Zitzer S F, Charlet T N, Housman D C, Coleman J S, Fenstermaker L K, Seemann J R, Nowak R S. 2000. Elevated CO₂ increases productivity and invasive species success in an arid ecosystem. *Nature*, 408: 79–82
- Song C, Dodds W K, Rüegg J, Argerich A, Baker C L, Bowden W B, Douglas M M, Farrell K J, Flinn M B, Garcia E A, Helton A M, Harms T K, Jia S, Jones J B, Koenig L E, Kominoski J S, McDowell W H, McMaster D, Parker S P, Rosemond A D, Ruffing C M, Sheehan K R, Trentman M T, Whiles M R, Wollheim W M, Ballantyne Iv F. 2018. Continental-scale decrease in net primary productivity in streams due to climate warming. *Nat Geosci*, 11: 415–420
- Song X W, Gao Y, Green S M, Dungait J A J, Peng T, Quine T A, Xiong B L, Wen X F, He N P. 2017. Nitrogen loss from karst area in China in recent 50 Years: An *in-situ* simulated rainfall experiment's assessment. *Ecol Evolution*, 7: 10131–10142
- Statham P J. 2012. Nutrients in estuaries—An overview and the potential impacts of climate change. *Sci Total Environ*, 434: 213–

227

- Syvitski J P M, Vörösmarty C J, Kettner A J, Green P. 2005. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, 308: 376–380
- Trimmer M, Grey J, Heppell C M, Hildrew A G, Lansdown K, Stahl H, Yvon-Durocher G. 2012. River bed carbon and nitrogen cycling: State of play and some new directions. *Sci Total Environ*, 434: 143–158
- Vidon P G F, Hill A R. 2004. Landscape controls on nitrate removal in stream riparian zones. *Water Resour Res*, 40: W03201
- Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, Chadwick O A. 2010. Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecol Appl*, 20: 5–15
- Watson A, Nedwell D B. 1998. Methane production and emission from peat. *Atmos Environ*, 32: 3239–3245
- Xu X, Han L, Luo X, Liu Z, Han S. 2009. Effects of nitrogen addition on dissolved N₂O and CO₂, dissolved organic matter, and inorganic nitrogen in soil solution under a temperate old-growth forest. *Geoderma*, 151: 370–377
- Yu G R, Jia Y L, He N P, Zhu J X, Chen Z, Wang Q, Piao S, Liu X J, He H L, Guo X B, Wen Z, Li P, Ding G A, Goulding K. 2019. Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade. *Nat Geosci*, 12: 424–429
- Zhang J J, Yang H, Li Y, Tian D, He N, Niu S. 2019. Soil and climate determine differential responses of soil respiration to nitrogen and acid deposition along a forest transect. *Eur J Soil Biol*, 93: 103097

(责任编辑: 李彦)