

· 专题:双清论坛“湿地保护和修复的基础理论及关键技术问题” ·

湿地面积时空变化特征及其生态效应^{*}

彭书时^{**} 席 毅

北京大学 城市与环境学院/地表过程分析与模拟教育部重点实验室,北京 100871

[摘 要] 内陆湿地在全球水文循环、生物地球化学循环和生物多样性保护等方面发挥着重要作用。然而,由于气候变化和人类活动的影响,近几十年全球范围的内陆湿地发生了明显退化。探究历史和未来湿地面积时空变化特征及其生态效应,对未来的气候变化政策制定和生物多样性保护具有重要意义。本文分析了湿地面积时空变化特征及其生态效应的研究现状和面临的挑战,探讨了未来的发展趋势和关键科学问题。在此基础上,本文建议未来应重点关注湿地时空变化特征与驱动机制、湿地水文过程与生物地球化学循环机制、湿地与气候变化、湿地生物多样性保护和湿地生态系统修复等研究方向,相关建议可为未来湿地面积时空变化特征及其生态效应的研究提供参考。

[关键词] 湿地;遥感;时空变化特征;过程模拟;生物多样性;甲烷

1 研究背景与意义

湿地是介于陆地系统和水体系统之间的过渡带,包括河流、湖泊、沼泽、泥炭地、红树林、珊瑚礁等,是非常珍贵的自然资源^[1, 2]。虽然内陆湿地仅占据陆地面积的 9.7% (12.9 Mkm², Million km²)^[3],却在全球水文循环、生物地球化学循环、生物多样性保护、文化和旅游等方面发挥着至关重要的作用^[1, 4, 5]。健康且具有生态功能的内陆湿地对于实现多个全球承诺至关重要。例如湿地,特别是泥炭地可以通过其巨大的碳存储和碳封存的潜力^[6],助力《巴黎协定》中各缔约国的自主减排贡献;湿地的缓冲作用可以降低洪水风险和减少风暴破坏^[4],促进《2015—2030 年仙台减轻灾难风险框架》中提出的“灾害风险管理”;维持稳定的湿地面积直接或间接服务于联合国《2030 年可持续发展议程》中的 75 个可持续发展指标^[1],包括“保护和恢复与水有关的生态系统”“遏制生物多样性损失”等具体目标;同时湿地涉及多项生物多样性相关的多边协议(《生物多样性公约》《保护迁徙野生动物物种公约》和《濒危野生动植物种国际贸易公约》等)的实施。此外,湿地还是重要的甲



彭书时 北京大学城市与环境学院研究员,主持国家自然科学基金优秀青年科学基金项目。长期从事陆地生态系统对全球变化的响应与反馈研究,以地面观测、遥感和模型模拟为主要方法,重点研究全球和区域湿地动态、生物地球化学循环、全球和中国甲烷收支。发表学术期刊论文 100 余篇,连续 4 年(2018—2021 年)入选科睿唯安高被引学者。

烷(CH₄, 仅次于二氧化碳(CO₂)的温室气体)排放源,每年全球湿地排放的 CH₄ 占全球自然排放量的 50%~84% (149~181 Tg CH₄ a⁻¹, 1 Tg=10¹² g)^[7]。

由于气候变化和不断加剧的人类活动,近几十年全球内陆自然湿地的面积不断缩小^[1, 8-10]。根据《全球湿地展望:2021 年特刊》的报道,自 1970 年以来,全球湿地面积丧失了 35% (仅限可获取数据的湿地),这一消失速度是森林的三倍,导致超过四分之一的湿地物种面临灭绝的风险^[11]。地面清查的数据显示,过去一个世纪,全球自然湿地的面积减少了 64%~71%,其中内陆湿地的损失(69%~75%)高于沿海湿地(62%~63%);相比之下,全球人工湿地如水库、水稻田、水产养殖池塘等则呈现出持续增

收稿日期:2022-02-14;修回日期:2022-05-19

^{*} 本文根据第 289 期“双清论坛”讨论的内容整理。

^{**} 通信作者,Email: speng@pku.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(41722101,41830643)的资助。

加的趋势^[12]。尽管目前全球自然湿地面积减少已经是公认的事实,但是基于不同的数据获取方法(地面清查或遥感观测)和不同的湿地定义获得的湿地面积时空变化仍存在很大的不确定性^[3, 13]。如图1所示,当前湿地数据估算全球水体或湿地的面积为0.49~13.0 Mkm²。如此差异巨大的湿地时空动态估算不仅局限了历史湿地退化及其生态效应的研究,也限制了未来气候变化情景下湿地面积时空变化特征及其生态效应的预测和评估。

准确估算湿地面积的时空变化特征是探究湿地相关生态功能的重要前提。在全球变化不断加剧的背景下,识别和保护那些具有重要生态功能的湿地对于未来生物多样性保护、适应和减缓气候变暖有非常重要的科学意义和现实紧迫性。

2 研究现状与未来趋势

2.1 湿地面积时空变化特征的研究方法

早期湿地面积时空变化特征的研究主要依赖于地面清查数据。1987年,Matthews和Fung^[14]使用联合国教科文组织提供的植被类型图、联合国粮农组织提供的土壤分类图和一系列航空调查得到的全球淹水数据库,产生了全球第一套静态的湿地地图。基于1°×1°的空间分辨率,该地图估算的全球湿地面积大约为5.3 Mkm²,被广泛用于湿地甲烷排放相关的研究^[15, 16]。此后,随着更精确的输入数据包括植被、土壤、地形和水体数据的提出,陆续有研究产生新的全球/区域的静态湿地地图^[3, 17, 18]。然而,由于静态的湿地地图通常受制于人为判别,不同研究得到的全球湿地的面积存在相当大的分歧(3.6~12.9 Mkm²,图1)。虽然静态的湿地地图不能应用

于湿地面积时空变化特征的研究,但是静态的湿地产品往往人工识别了很多小尺度的湿地,可以帮助补充其他湿地制图方法缺失的湿地类型。

从20世纪50年代末前苏联发射第一颗人造卫星起,卫星遥感的迅速发展大大促进了全球湿地制图的发展。当前基于卫星遥感的产物主要使用可见光/近红外、主动微波和被动微波识别地表水体^[19]。可见光/近红外卫星遥感可以提供非常高的空间分辨率,如欧洲委员会联合研究中心(European Commission's Joint Research Centre, JRC)生产的全球地表水体数据的空间分辨率可达30 m^[20],但是可见光不能穿透云和茂密的植被;主动微波遥感观测使用综合孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)和测高计,可以穿透云和植被并且提供非常高的分辨率,但是仅能覆盖有限的时间和空间范围,如基于欧洲航天局ENVISAT卫星ASAR(Advanced SAR)产生的湿地产品^[21, 22];被动微波产品也可以穿透云和植被,但是其空间分辨率较粗(10~50 km),并且容易受到地表温度的影响^[19]。由于不同波段各有优劣,后续的研究逐渐融合多波段卫星观测产品,尽可能最大化地提取地表的淹水信息。2007年,Prigent等^[23]组合主动微波、被动微波、可见光/近红外波段,产生了全球第一套长时间序列(1993—2007年)多源遥感湿地产品GIEMS-1,时间分辨率为每月,空间分辨率为25 km×25 km。由于25 km的空间分辨率仍不能满足一些需要更高分辨率湿地产品的研究,后续的研究开发了基于高分辨率的遥感产品如SAR影像和地形信息如数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的降尺度算法,可以产生空间分辨率高达500 m的湿地产品^[24, 25]。

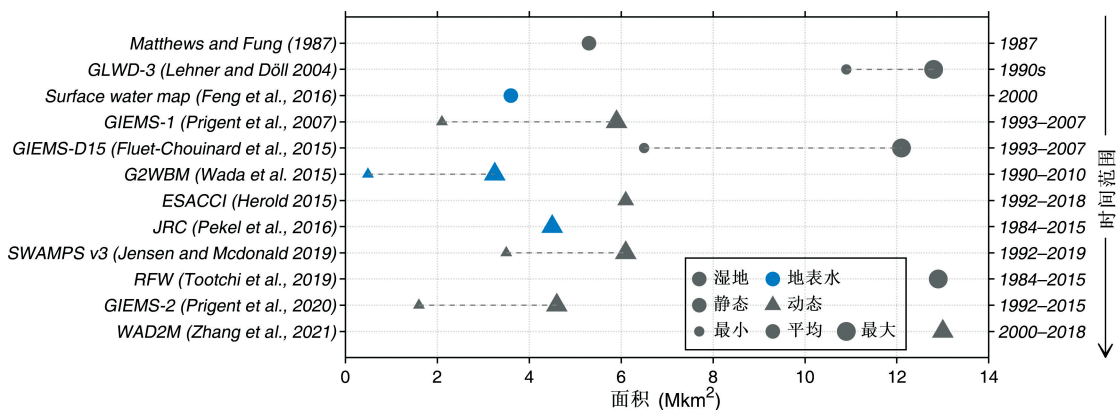


图1 12套全球水体数据估算的全球湿地/地表水的面积
图中使用标记的颜色、形状、大小分别区分了不同的水体类型(湿地或地表水体)、数据类型(静态或动态)以及时间范围(最小、平均或最大),详见文献^[3]和^[14]。

目前为止,基于遥感的湿地产品可以提供长达~30年、覆盖全球范围的湿地动态信息。

考虑到基于遥感观测的湿地产品覆盖的时间范围有限且更新速度慢,一些研究借助水文模型模拟湿地面积的时空变化特征。TOPMODEL (TOPography-based Hydrological MODEL)^[26]是当前湿地模拟中应用最为普遍的模型。基于几个简单的水文假设,TOPMODEL建立了次级流域或次级格点的综合地形指数(Compound Topography Index,CTI)和水位的关系。使用当前可获取的高分辨率地形数据,该模型可以将流域的平均水位(或者平均水分亏缺状态)降尺度为流域内土壤达到饱和(即水位超过地表)的比例。土壤达到饱和的面积即近似认为该流域或该格点的湿地面积。TOPMODEL可以基本重现遥感观测湿地面积的空间格局和时间变化^[27-29],但是由于模型本身的假设,TOPMODEL对一些特殊的湿地类型如洪泛湿地、泥炭地、热喀斯特湖泊的模拟仍存在局限^[30-32]。目前TOPMODEL的算法已经被应用在多个陆面过程模型中,如ORCHIDEE^[28]、JULES^[33]、LPX-Bern^[27]、LPJ-wsl^[29]等。耦合陆面过程模型使得TOPMODEL可以分析过去和预测未来湿地面积的时空变化特征及相应的生态效应^[34-37]。

2.2 湿地面积的时空变化规律

近几十年,地面清查和遥感观测均表明全球大部分地区的自然内陆湿地逐渐减少^[1]。基于可获取的清查数据,Dixon等^[38]发现全球内陆湿地的面积在1970—2015年间损失了35%,在各个大洲中,损失最严重的为拉丁美洲。Davidson等^[12]发现,近几十年北美的湿地面积损失速率一直维持在比较低的水平($\sim -0.5\% a^{-1}$),欧洲的湿地损失速率明显下降($\sim -0.3\% a^{-1}$),而亚洲的损失速率仍然保持在相对较高的水平($\sim -1.5\% a^{-1}$)。基于遥感的湿地数据结果与清查结果一致,如GIEMS-1显示1993—2007年全球的淹水面积以每年 $0.022 Mkm^2$ (0.4%)的速率减少,淹水面积减少最剧烈的地区集中在热带和亚热带的南美和南亚^[39]。与全球湿地的变化趋势一致,地面清查和遥感观测数据显示,我国自然湿地的面积也在逐渐减小,且其减少速率高于全球的结果。从第一次全国湿地资源清查(1995—2003年)到第二次全国湿地资源清查(2009—2013年),我国 $100 hm^2$ 以上的湿地损失了339.63万公顷($-0.88\% a^{-1}$),其中自然湿地损失了337.62万公顷($-0.93\% a^{-1}$)^[40, 41]。遥感观测

数据则显示,我国自然湿地的面积在1978—2008年间减少了33% ($-1.10\% a^{-1}$),而人工湿地增加了122% ($+4.06\% a^{-1}$)^[42]。

与历史湿地变化情况不同,未来湿地面积时空变化特征的研究显示,未来一个世纪全球的湿地面积将呈现增加趋势。例如,Zhang等^[34]使用LPJ-wsl陆面过程模型(使用TOPMODEL模拟湿地)模拟了耦合模式比较计划阶段五(Coupled Model Intercomparison Project,CMIP5)四个气候变暖情景下21世纪全球内陆湿地的动态,发现21世纪末全球内陆湿地的面积在四个情景下分别增加了5%、8%、12%和20%,增加的湿地主要集中在北半球高纬度地区,而热带地区的湿地面积略有减少。Comyn-Platt等^[35]使用中等复杂度的气候模式的输出结果,驱动陆面过程模型JULES(使用TOPMODEL模拟湿地),发现冻土区的湿地面积在未来升温 $1.5^\circ C$ 和 $2^\circ C$ 的情景下会分别增加 $0.26 Mkm^2$ 和 $0.28 Mkm^2$ 。Kleinen等^[43]使用MPI-ESM地球系统模式,模拟了1860至3000年全球湿地的变化,预测未来1000年热带的湿地将由于降水增加发生扩张,而高纬度的湿地将由于冰冻减少发生扩张。

2.3 湿地面积时空变化的驱动因素

近几十年内陆湿地的退化主要归因于逐渐加剧的人类活动。人类活动可以直接或间接地影响湿地的面积。根据2018年《全球湿地展望》^[1],直接影响湿地的人类活动主要包含四类:(1)改变湿地的物理属性如水质、水流的频率、沉淀物等;(2)提取湿地中的水、生物或者土壤和泥炭;(3)输入养分、化学物质或引进侵略性物种进入湿地;(4)改变湿地结构如排干、转换为其他土地覆盖类型、火烧。间接影响湿地的人类活动包括水利工程、农业发展、基础设施建设和旅游业发展。使用遥感观测或水文模型,已有的研究表明人类取水、排干或转换湿地作为农田或建设用地、水利工程是造成历史的湿地退化最主要的三个因素^[1]。van Beek等^[44]和Wada等^[45]分别使用水文模型PCR-GLOBWB和清查数据计算了全球水分的供应和需求,发现我国的华北地区、印度、西亚和美国的中西部地区是全球水资源压力较大的热点区域,水量减少会直接造成这些地区的湿地退化。过量的人类取水甚至导致里海和乍得湖几近枯竭^[20, 46]。欧洲的湿地排干活动甚至可以追溯到罗马时代,北美和南美可以追溯到17世纪,我国的湿地排干也至少有2000年的历史^[12]。

近一个世纪,由于持续增加的人口对粮食和居住地需求的增加,全球部分湿地已被排干作为农田或建设用地。基于泥炭地清查数据,Leifeld等^[47]发现全球大约有 5.1×10^7 公顷($\sim 12\%$)的泥炭地被排干转成农田、草地或森林,其中,南亚和北欧的泥炭地由于人为排干活动造成了比较严重的退化,而南美和非洲的热带泥炭地退化程度较低。水利工程包括大坝、水库的修建或跨区域调水,会通过改变地表水文过程的季节格局而影响湿地的面积动态。目前,水库、大坝的过程已经被包含在一些水文模型(如WBMplus^[48])或陆面过程模式(如OECHIDEE^[49])中。虽然单个驱动因子对湿地面积动态影响的调查已取得进展,综合多种驱动力且包括自然的驱动因子的研究仍然欠缺。

2.4 湿地面积变化的生态效应

2.4.1 综合气候效应

湿地具有非常丰富的生态系统功能,湿地退化无疑会导致相关湿地生态功能的损失。作为一个重要的大气CO₂的汇,湿地中的泥炭地以 $\sim 3\%$ 的陆地面积占比存储了全球总土壤有机碳库的21%(644 Gt C, 1 Gt = 10^{15} g)。已经排干的泥炭地大约存储了81 Gt C,历史的排干活动导致了每年1.91(CI为0.31 \sim 3.38) Gt CO₂-eq的温室气体排放,修复泥炭地可以有效地减少泥炭地退化对气候变暖的正反馈^[47]。与此同时,湿地也是一个重要的CH₄排放源。恢复湿地需要同时评估其增加CO₂汇和增加CH₄排放的综合气候效应。最近的研究已经开始关注湿地面积变化导致的综合温室气体效应,发现恢复湿地增加碳汇的气候效应强于恢复湿地增加CH₄排放的变暖效应^[50, 51]。因此,恢复湿地被认为是一个重要的减缓气候变暖的自然解决方案^[52],然而,未来气候变暖下全球湿地面积将发生扩张,这将增加湿地排放的CH₄^[34, 35, 43]。总体上,目前未来不同地区不同类型湿地面积变化导致综合气候效应仍缺少系统的研究,冻土地区湿地的综合气候效应尚不清楚^[53],未来气候变暖背景下湿地面积变化的综合气候效应不容忽视。

2.4.2 生物多样性问题

湿地退化相关的一系列生态问题,包括栖息地损失、富营养化、水文状态干扰、水质恶化、过度开采和外来物种入侵也严重威胁着栖息在湿地上的物种。根据世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)红色名录的评估结果,19 500种依赖湿地的物种有四分之一濒临灭

绝风险,其中,栖息于内陆湿地的物种面临的威胁高于其周围陆地上生活的物种^[54]。自1980年以来,湿地的三大类群(哺乳动物、鸟类和两栖类)之一的两栖动物一直面临着最高的灭绝风险^[55]。湿地物种面临威胁最高的地区集中在热带地区,比如马达加斯加、新西兰、南美洲的安第斯山脉地区^[54]。IUCN的调查结果主要基于统计数据,无法用于归因和预测,最近陆续有研究使用种—面积理论、经验模型或遥感影像分析湿地相关生物多样性的变化。例如,千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MEA)使用综合评估模型IMAGE和种—面积关系预测由于土地利用、气候变化和氮沉降导致的生物多样性损失^[56]。Janse等^[57]组合观测数据建立的经验模型(GLOBIO-Aquatic)和IMAGE,评估了人类活动对水生生态系统生物多样性的影响。Kalacska等^[58]使用1984—2015年的Landsat影像,发现坦桑尼亚北部本土的丽鱼科鱼的栖息地严重损失与人口增加造成的农田扩张密切相关。Xi等^[36]使用CMIP5地球系统模式的输出结果,发现未来一个世纪,即便不考虑人类活动,气候变化也将导致地中海沿岸、墨西哥、中美洲和南非的国际重要湿地遭受超过10%的损失,湿地面积的损失将增加栖息在这些湿地上的水鸟和鱼类灭绝的风险。虽然当前评估和预测湿地生物多样性的模型已有初步探索,但是在人类活动和气候变化的背景下,耦合社会经济模型、地球系统模型和湿地生物多样性模型的大尺度研究仍亟需发展。

3 湿地面积时空变化特征与生态效应研究的关键科学问题

图2展示了湿地面积时空变化特征及其生态效应研究的框架图。湿地面积时空变化监测不确定性大、湿地面积变化导致的一系列复杂的气候和生态环境效应是当前湿地研究面临的两大挑战。要发挥湿地在未来气候变化减缓和生物多样性保护中的重要作用,需要关注以下四个关键科学问题。

3.1 湿地时空动态的高分辨率监测与模拟

湿地同时具有陆地生态系统和水体生态系统的某些特征,因此准确定义湿地的界限非常困难^[59]。明确不同湿地制图方法之间定义的差别,以统一的定义建立长时间序列湿地时空变化数据库或地图集,是研究湿地生态效应变化和修复与保护湿地的重要前提。不同湿地类型的时空分布是湿地研究的基础,目前仍缺乏全球高时空分辨率高精度的湿地

分布图。当前普遍使用的湿地水文模型 TOPMODEL 对泥炭地、热喀斯特湖、洪泛湿地等特殊湿地类型的过程模拟有待改进。随着新一代水体监测相关的卫星(如 the Cyclone Global Navigation Satellite System, CYGNSS)和国际性计划(如 the US-French Surface Water and Ocean Topography Mission, SWOT)的实施,如何发展更完善的湿地动态模拟算法和遥感图像处理算法^[19, 60]是量化湿地高分辨率时空变化的关键瓶颈。

3.2 湿地水文和生物地球化学循环过程的理解与模拟

湿地相关的水文过程决定着湿地的形成和发展,对湿地水文过程的准确刻画不仅有助于湿地面积时空变化的模拟,也紧密关联着湿地一系列生态系统功能^[59]。湿地相关的碳氮磷循环过程、温室气体源汇功能对于分析历史和未来气候变化和人类活动对湿地生态效应的影响,以及预测未来湿地变化对气候的反馈非常重要。深入理解和模拟湿地关键的水文及生物地球化学循环过程是评估和预测湿地时空变化特征及其生态效应的基础^[61]。

3.3 湿地对气候变化和人类活动的响应与反馈

湿地和气候变化与人类活动有着紧密的相互作用。一方面,气候变化通过影响陆地生态系统水文过程包括降水、蒸发、径流和土壤水影响湿地的面积及其生态系统功能;人类活动通过改变湿地的水文、水质、结构影响湿地的面积及其生态系统功能;另一方面,湿地作为重要的大气 CO₂ 的汇和 CH₄ 的源,

湿地的面积变化会通过改变温室气体的源汇功能从面对气候变化产生反馈。揭示全球湿地动态和功能对气候变化和人类活动如何响应和反馈是当前湿地研究的热点和难点。

3.4 湿地生物多样性保护

湿地生物多样性保护对于实现未来可持续发展至关重要。然而,当前国内外湿地生物多样性相关的研究仍比较薄弱,主要侧重于湿地的动、植物多样性研究,而浮游生物、无脊椎动物和微生物多样性的研究相对较少^[62]。湿地生物多样性保护多以小尺度静态研究为主,深入理解湿地生物多样性的时空演变特征、种群动态、物种灭绝风险、候鸟大尺度迁徙规律是湿地生物多样性保护的瓶颈。

4 湿地面积时空变化特征与生态效应研究的建议

针对湿地面积时空变化及其生态效应研究的关键科学问题,未来的主要研究方向主要有以下五个方面(图 2)。

4.1 湿地面积时空变化特征与驱动机制

研发全球和区域高分辨率、高精度的湿地类型和特征分布图;融合多源卫星遥感数据,同化地面湿地清查数据,结合水文过程模型,建立标准统一的长时间序列全球和区域湿地时空变化数据集;揭示全球和区域湿地时空变化特征,结合观测数据集和模型模拟,阐明湿地面积时空变化的驱动机制,量化气候变化和人类活动对湿地退化的贡献,提出未来气候变化情景下湿地优先保护策略。

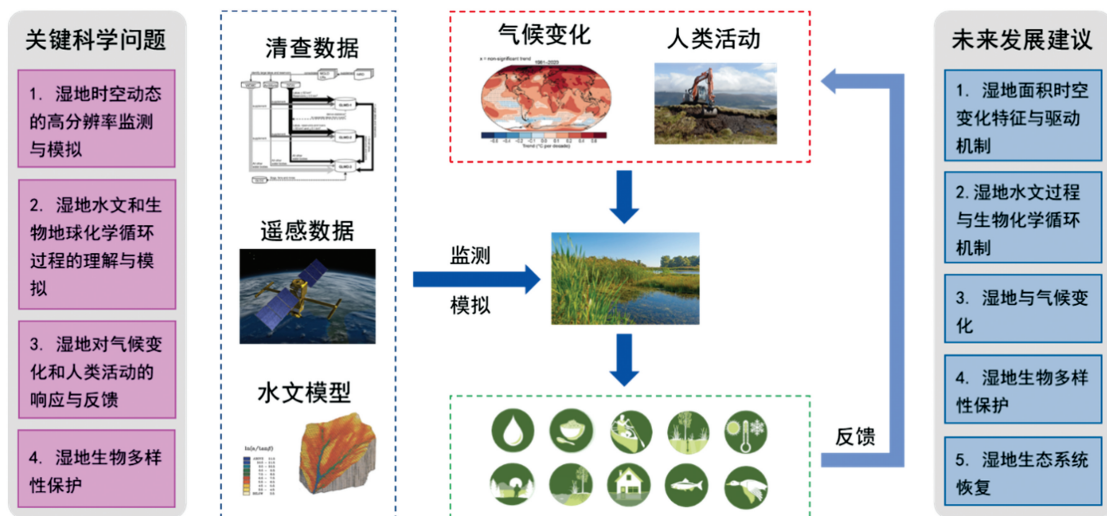


图 2 湿地面积时空变化特征及其生态效应研究框架图

4.2 湿地水文过程与生物地球化学循环机制

揭示不同类型湿地包括林下湿地、沼泽湿地、泥炭地、热喀斯特湖、洪泛湿地等水文过程与湿地面积时空演变规律;探讨不同湿地关键生物地球化学循环微生物机制;结合水文过程与湿地氧化还原特征,分析湿地对氮磷等污染物去除潜力;针对湿地独特的水文和生物地球化学循环过程,建立湿地碳氮磷硫循环模型,开展生物地球化学循环的综合模拟。^[3]

4.3 湿地与气候变化

揭示不同类型湿地面积动态及生态功能对气候变化的响应机制;量化气候变化背景下不同类型湿地温室气体的源汇功能,评估全球和区域湿地温室气体源汇的综合气候效应;耦合湿地水文模型和湿地生态系统功能模型,模拟不同气候变化情景下湿地面积的时空变化规律及其生态效应;探讨国际减排目标和我国双碳计划下湿地的碳汇潜力、甲烷排放和温室气体的综合气候效应;结合地球系统模型,定量刻画湿地面积时空变化及其综合气候效应对气候的反馈,从而准确评估不同温升目标下温室气体的剩余排放空间。

4.4 湿地生物多样性保护

建立重要湿地保护物种清单,明确不同物种保护等级,加大濒危和珍稀湿地物种的保护力度;加强湿地生物多样性监测,发展传感器自动监测技术,构建人工智能生物多样性监测网络,实现湿地物种动态的长时间、大尺度监测;拓宽湿地物种多样性的时空研究尺度,建立湿地物种分布模型,预测不同气候变化情景下湿地生物多样性和物种灭绝风险,同时推进功能多样性、景观多样性、生态系统多样性和遗传多样性的研究,从而为湿地多样性保护提供科学基础和实践指导。

4.5 湿地生态系统恢复

深入理解气候变化和人类活动多因子共同作用下湿地退化的过程和机制;揭示湿地的形成发展过程,结合生态系统恢复理论^[63],构建湿地水文—土壤—植被一体化恢复重建技术,综合评估湿地恢复的生态、社会和经济效益;建立湿地恢复和管理关键指标体系,优化湿地管理和资源利用方式,提出湿地可持续发展方案。

参 考 文 献

[1] Gardner, RC, Finlayson CM. Global wetland outlook: State of the world's wetlands and their services to people (2018-10-05)/[2022-02-14]. https://medwet.org/wp-content/uploads/2018/09/ramsar_gwo_english_web.pdf.

[2] 刘兴土,姜明,文波龙. 我国湿地学科建设与发展的若干问题探讨. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2012, 11(4): 289—294.

[3] Tootchi A, Jost A, Ducharme A. Multi-source global wetland maps combining surface water imagery and groundwater constraints. *Earth System Science Data*, 2019, 11(1): 189—220.

[4] Finlayson M, Cruz RD, Davidson N, et al. Millennium ecosystem assessment: ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis. Chicago: Island Press, 2005.

[5] Hansen AT, Dolph CL, Foufoula-Georgiou E, et al. Contribution of wetlands to nitrate removal at the watershed scale. *Nature Geoscience*, 2018, 11(2): 127—132.

[6] Yu ZC. Northern peatland carbon stocks and dynamics: a review. *Biogeosciences*, 2012, 9(10): 4071—4085.

[7] Saunio M, Stavert AR, Poulter B, et al. The global methane budget 2000—2017. *Earth System Scientific Data*, 2020, 12(3): 1561—1623.

[8] Keddy PA, Fraser LH, Solomeshch AI, et al. Wet and wonderful: the world's largest wetlands are conservation priorities. *BioScience*, 2009, 59(1): 39—51.

[9] Creed IF, Lane CR, Serran JN, et al. Enhancing protection for vulnerable waters. *Nature Geoscience*, 2017, 10(11): 809—815.

[10] Zedler JB, Kercher S. WETLAND RESOURCES: status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annual Review of Environment and Resources*, 2005, 30: 39—74.

[11] Ramsar Convention on Wetlands. Global wetland outlook: special edition 2021. Ramsar: Ramsar Convention Secretariat, 2021.

[12] Davidson NC. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 2014, 65(10): 934.

[13] Zhang Z, Fluet-Chouinard E, Jensen K, et al. Development of the global dataset of wetland area and dynamics for methane modeling (WAD2M). *Earth System Science Data*, 2021, 13(5): 2001—2023.

[14] Matthews E, Fung I. Methane emission from natural wetlands: global distribution, area, and environmental characteristics of sources. *Global Biogeochemical Cycles*, 1987, 1(1): 61—86.

[15] Bousquet P, Ciais P, Miller JB, et al. Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability. *Nature*, 2006, 443(7110): 439—443.

[16] Collins WJ, Bellouin N, Doutriaux-Boucher M, et al. Development and evaluation of an Earth-System model-HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 2011, 4(4): 1051—1075.

[17] Lehner B, Döll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *Journal of Hydrology*, 2004, 296(1—4): 1—22.

[18] Gumbrecht T, Roman-Cuesta RM, Verchot L, et al. An expert system model for mapping tropical wetlands and peatlands reveals South America as the largest contributor. *Global Change Biology*, 2017, 23(9): 3581—3599.

- [19] Prigent C, Lettenmaier DP, Aires F, et al. Toward a high-resolution monitoring of continental surface water extent and dynamics, at global scale: from GIEMS (global inundation extent from multi-satellites) to SWOT (surface water ocean topography). *Surveys in Geophysics*, 2016, 37 (2): 339—355.
- [20] Pekel JF, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016, 540(7633): 418—422.
- [21] Bartsch A, Trofaier AM, Hayman G, et al. Detection of open water dynamics with ENVISAT ASAR in support of land surface modelling at high latitudes. *Biogeosciences*, 2012, 9(2): 703—714.
- [22] Kuenzer C, Guo HD, Huth J, et al. Flood mapping and flood dynamics of the Mekong delta: ENVISAT-ASAR-WSM based time series analyses. *Remote Sensing*, 2013, 5 (2): 687—715.
- [23] Prigent C, Papa F, Aires F, et al. Global inundation dynamics inferred from multiple satellite observations, 1993—2000. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(D12): D12107.
- [24] Aires F, Papa F, Prigent C. A long-term, high-resolution wetland dataset over the Amazon Basin, downscaled from a multiwavelength retrieval using SAR data. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, 14(2): 594—607.
- [25] Fluet-Chouinard E, Lehner B, Rebelo LM, et al. Development of a global inundation map at high spatial resolution from topographic downscaling of coarse-scale remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 158: 348—361.
- [26] Beven KJ, Kirkby MJ. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, 24 (1): 43—69.
- [27] Stocker BD, Spahni R, Joos F. DYP TOP: a cost-efficient TOPMODEL implementation to simulate sub-grid spatio-temporal dynamics of global wetlands and peatlands. *Geoscientific Model Development*, 2014, 7 (6): 3089—3110.
- [28] Ringeval B, Decharme B, Piao SL, et al. Modelling sub-grid wetland in the ORCHIDEE global land surface model: evaluation against river discharges and remotely sensed data. *Geoscientific Model Development*, 2012, 5(4): 941—962.
- [29] Zhang Z, Zimmermann NE, Kaplan JO, et al. Modeling spatiotemporal dynamics of global wetlands: comprehensive evaluation of a new sub-grid TOPMODEL parameterization and uncertainties. *Biogeosciences*, 2016, 13 (5): 1387—1408.
- [30] Lu XL, Zhuang QL, Liu YL, et al. A large-scale methane model by incorporating the surface water transport. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(6): 1657—1674.
- [31] Schuur EAG, McGuire AD, Schädel C, et al. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 2015, 520(7546): 171—179.
- [32] Tan ZL, Zhuang QL. Methane emissions from pan-Arctic lakes during the 21st century: an analysis with process-based models of lake evolution and biogeochemistry. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120 (12): 2641—2653.
- [33] Gedney N, Cox PM. The sensitivity of global climate model simulations to the representation of soil moisture heterogeneity. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4(6): 1265—1275.
- [34] Zhang Z, Zimmermann NE, Stenke A, et al. Emerging role of wetland methane emissions in driving 21st century climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(36): 9647—9652.
- [35] Comyn-Platt E, Hayman G, Huntingford C, et al. Carbon budgets for 1.5 and 2°C targets lowered by natural wetland and permafrost feedbacks. *Nature Geoscience*, 2018, 11(8): 568—573.
- [36] Xi Y, Peng SS, Ciais P, et al. Future impacts of climate change on inland Ramsar wetlands. *Nature Climate Change*, 2021, 11(1): 45—51.
- [37] Chen WZ, Ciais P, Qiu CJ, et al. Wetlands of north Africa during the mid-Holocene were at least five times the area today. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48 (20): e2021GL094194.
- [38] Dixon MJR, Loh J, Davidson NC, et al. Tracking global change in ecosystem area: the Wetland Extent Trends index. *Biological Conservation*, 2016, 193: 27—35.
- [39] Prigent C, Papa F, Aires F, et al. Changes in land surface water dynamics since the 1990s and relation to population pressure. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39 (8): L08403.
- [40] 国家林业和草原局. 第一次全国湿地资源调查(1995—2003年). 北京: 国家林业和草原局, 2004.
- [41] 国家林业和草原局. 第二次全国湿地资源调查(2009—2013年). 北京: 国家林业和草原局, 2014.
- [42] Niu ZG, Zhang HY, Wang XW, et al. Mapping wetland changes in China between 1978 and 2008. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(22): 2813—2823.
- [43] Kleinen T, Gromov S, Steil B, et al. Erratum: Atmospheric methane underestimated in future climate projections. *Environmental Research Letters*, 2021, 16 (11): 119502.
- [44] van Beek LPH, Wada Y, Bierkens MFP. Global monthly water stress: 1. Water balance and water availability. *Water Resources Research*, 2011, 47(7): W07517.
- [45] Wada Y, van Beek LPH, Viviroli D, et al. Global monthly water stress: 2. Water demand and severity of water stress. *Water Resources Research*, 2011, 47(7): W07518.
- [46] Coe MT, Foley JA. Human and natural impacts on the water resources of the Lake Chad Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106 (D4): 3349—3356.
- [47] Leifeld J, Menichetti L. The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nature Communications*, 2018, 9: 1071.

- [48] Wisser D, Fekete BM, Vörösmarty CJ, et al. Reconstructing 20th century global hydrography: a contribution to the Global Terrestrial Network- Hydrology (GTN-H). *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14 (1): 1—24.
- [49] Yin Z, Ottlé C, Ciais P, et al. Irrigation, damming, and streamflow fluctuations of the Yellow River. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(3): 1133—1150.
- [50] Evans CD, Peacock M, Baird AJ, et al. Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions. *Nature*, 2021, 593(7860): 548—552.
- [51] Huang YY, Ciais P, Luo YQ, et al. Tradeoff of CO₂ and CH₄ emissions from global peatlands under water-table drawdown. *Nature Climate Change*, 2021, 11 (7): 618—622.
- [52] Günther A, Barthelmes A, Huth V, et al. Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions. *Nature Communications*, 2020, 11: 1644.
- [53] Hugelius G, Loisel J, Chadburn S, et al. Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117 (34): 20438—20446.
- [54] Collen B, Whitton F, Dyer EE, et al. Global patterns of freshwater species diversity, threat and endemism. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(1): 40—51.
- [55] Butchart SHM, Resit Akçakaya HR, Chanson J, et al. Improvements to the red list index. *PLoS One*, 2007, 2(1): e140.
- [56] Millennium Ecosystem Assessment (MA). *Ecosystems and human well-being*. Washington DC: Island Press, 2005.
- [57] Janse JH, Kuiper JJ, Weijters MJ, et al. GLOBIO-Aquatic, a global model of human impact on the biodiversity of inland aquatic ecosystems. *Environmental Science & Policy*, 2015, 48: 99—114.
- [58] Kalacska M, Arroyo-Mora J, Lucanus O, et al. Land cover, land use, and climate change impacts on endemic cichlid habitats in northern Tanzania. *Remote Sensing*, 2017, 9 (6): 623.
- [59] 陈宜瑜, 吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向. *湿地科学*, 2003, 1(1): 7—11.
- [60] Ruf CS, Chew C, Lang T, et al. A new paradigm in earth environmental monitoring with the CYGNSS small satellite constellation. *Scientific Reports*, 2018, 8: 8782.
- [61] 左平, 宋长春, 钦佩. 从第七届国际湿地会议看全球湿地研究热点及进展. *湿地科学*, 2005, 3(1): 66—73.
- [62] 杨永兴. 国际湿地科学研究的主要特点、进展与展望. *地理科学进展*, 2002, 21(2): 111—120.
- [63] 崔保山, 刘兴土. 湿地恢复研究综述. *地球科学进展*, 1999, 14(4): 358—364.

Spatiotemporal Dynamics of Wetland Extent and Its Ecological Effects

Peng Shushi* Xi Yi

College of Urban and Environmental Sciences/Key Laboratory for Earth Surface Processes of Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871

Abstract Inland wetlands play a critical role in global hydrological cycle, biogeochemical cycle, and biodiversity conservation and so on. However, due to climate change and intense human activities, inland wetlands have been lost significantly worldwide. Investigating historical and future spatiotemporal dynamics of wetland extent and the associated effects on ecological functions, climate change and biodiversity conservation, is of great significance for the decision-making of policies related to climate change and biodiversity conservation in the future. This paper reviews the current status and challenges, and discusses the key scientific topics and gaps in the study of the wetland dynamics and its ecological consequences. The suggestions from this paper that more attention should be paid to the studies on spatiotemporal dynamics of wetland extent and its drivers, wetlands hydrological cycle and biogeochemical cycles, wetlands and climate change, wetland biodiversity conservation, and wetland ecosystem restoration in the future can provide guidance to basic researches in relevant fields.

Keywords wetlands; remote-sensing; spatio-temporal dynamics; process-based simulation; biodiversity; methane

(责任编辑 张强)

* Corresponding Author, Email: speng@pku.edu.cn