

生态水文过程观测与模拟的发展与展望

孙晓敏,袁国富,朱治林,张心昱,温学发,唐新斋

(中国科学院地理科学与资源研究所 生态网络观测与模拟重点实验室 CERN 水分分中心, 北京 100101)

摘要:中国生态系统研究网络(CERN)水分分中心是管理CERN陆地生态系统台站水环境长期监测的专业分中心,也是从事生态水文学研究的一个学术团队。长期以来,CERN水分分中心致力于先进的生态水文观测方法和技术的引进与研究,先后在大型蒸渗仪、涡度相关技术、实验遥感方法、大孔径闪烁仪和同位素技术应用于生态水文过程的观测方面做了许多卓有成效的工作,对生态水文过程野外观测方法先进技术的应用在国内起到引领作用。CERN水分分中心也开展了以陆面蒸散过程机理与模拟的研究,围绕华北农田作物蒸散过程模拟方法,从早期的经验模型,到具有物理基础的模型,发展到基于水碳耦合机理的蒸散过程模拟方法。未来的发展,需要进一步深入推进新技术新方法在生态水文过程观测中的应用,并构建不同生态系统生态水文过程机理模型,为流域和区域水资源管理及生态系统管理提供科学数据和科学工具。

关键词:生态水文;大型蒸渗仪;涡度相关;大孔径闪烁仪;稳定同位素;实验遥感

中国生态系统研究网络(以下简称CERN)水分分中心是CERN设置的用于管理分布于全国不同区域的CERN陆地生态系统台站水环境长期监测的专业分中心。CERN水分分中心挂靠在中国科学院地理科学与资源研究所,它本身也是地理科学与资源研究所的一个研究团队,属于中科院网络观测与模拟重点实验室的一部分。

CERN水分分中心的学科研究方向瞄准生态水文学研究。作为生态学与水文学的交叉学科,生态水文学目前得到广泛重视^[1],亦在中国诸多研究机构 and 高校蓬勃开展开来。生态水文学的含义十分广泛,研究内容也涵盖从机理过程到政策管理的诸多领域^[2],CERN水分分中心根据自身特点和研究队伍构成,目前主要开展生态水文过程野外观测方法的研究和生态水文过程模拟研究。本文对CERN水分分中心在上述相关研究中取得的进展进行梳理,展望其未来发展方向,以期促进学科深入交流和研究。

1 生态水文过程观测方法研究进展

CERN水分分中心长期致力于与生态水文过程相关的野外实验观测方法研究,除了作为CERN

核心任务的野外台站水环境长期监测规范的研究之外,水分分中心分别在大型蒸渗仪技术的引进和应用、涡度相关技术的引进和应用、实验遥感方法的应用、大孔径闪烁仪技术的引用和应用、同位素技术的引进和应用等方面做了许多先导性和开创性的工作,为中国生态水文过程的野外观测技术和方法的发展做出了独特的贡献。

1.1 CERN 陆地生态系统水环境的长期监测规范

长期联网监测不同区域陆地生态系统水环境动态是CERN长期监测的重要内容之一,是研究陆地生态系统水循环和生态水文过程的重要基础。水分分中心作为负责制定和实施陆地生态系统水环境长期监测的职能部门,领导制定了CERN陆地生态系统水环境长期监测规范:确定了CERN台站长期监测的水环境指标、规范了监测的场地设置方法和监测频率、统一了观测方法和设施、提出了监测数据的质量控制标准和数据共享规范等^[3-4]。目前,正在就长期监测数据的质量管理规范进行深入归纳和研究。

CERN陆地生态系统水环境的监测呈现4个特点:①水环境的监测是定点观测,以CERN所属的野外生态试验站为基地,在台站的观测场地或特定位置设置观测点进行定点观测,监测点位置固定;

收稿日期:2010-01; 修订日期:2010-07.

基金项目:国家自然科学基金项目(30770409,30970517);中科院重要方向项目(KZCX2-YW-433-01)。

作者简介:孙晓敏(1957-),男,研究员,CERN水分分中心主任。主要从事地表通量观测技术和实验方法的研究。1997年获中国科学院自然科学二等奖(排名第3);2010年获得国家科技进步二等奖(排名第5)。

②水环境的监测是长期监测,尺度一般设置百年以上,是用来长期监测生态系统结构和功能演变的一部分,由于是长期监测,一些反映短的时间尺度的过程指标往往不是CERN监测关注的对象;③水环境监测是联网监测,是将分布在中国不同区域和不同生态类型的台站联合起来,按照统一的规范实施统一的观测,而不是各个生态站自行独立的观测;④水环境监测目前来看仍然是点尺度上的观测,设置的观测点有限,没有在流域尺度上对水分运动过程进行较大规模的观测,亦没有结合遥感进行不同下垫面的大尺度观测。

CERN陆地生态系统水环境的长期监测包括对水量、水质和水分运动3个方面的野外监测,具体的指标包括土壤湿度、地下水位、径流、水面蒸发和地表蒸发等多种水文指标,以及不同水体(降水、静止地表水、流动地表水、地下水、土壤水等)中的8大离子、COD、矿化度和pH值等水质指标^[3]。目前的数据涵盖农田、森林、草地、荒漠和沼泽生态系统类型,数据最早到1998年,从2004年开始,采用统一的监测规范和监测方法,利用“台站—分中心—综合中心”3级质控体系控制数据质量,经过3级质量控制的监测数据对社会开放共享。

CERN水环境长期监测数据是研究中国不同区域生态水文过程的重要基础数据。水分分中心对2003—2007年间CERN 31个典型陆地生态系统监测地表水和地下水,6个湖泊和海湾生态系统,1个城市生态系统地下水pH、矿化度(电导率)状况进行了初步分析^[5],揭示了中国不同生态系统、不同区域水质pH值和矿化度的基本特征,初步分析其形成机制,显示CERN长期监测数据的重要意义。

1.2 大型蒸渗仪技术的应用

大型称重式蒸渗仪(Lysimeter)是测量蒸发、研究土壤水与地下水交换规律的一种重要仪器,在涡度相关观测技术成熟以前,大型称重式蒸渗仪曾经是唯一的用于蒸发观测的“标准仪器”。1983—1984年,在黄秉维支持下,唐登银等与澳大利亚联邦科工组织麦克洛伊先生合作,以麦氏称重蒸渗仪为原型,在禹城站研制大型蒸渗仪。该蒸渗仪原状土体表面积 3 m^2 ,深度 2 m ,设备总重量超过 10 t ,蒸发测定分辨率达到 0.02 mm ,成为国内第一个测定蒸发的标准仪器^[6]。1990年,以此蒸渗仪为参照,李宝庆等又研制了更深土柱的大型蒸渗仪,曾是中国最大的称重式蒸渗仪($3.14\text{ m}^2\times 5\text{ m}$ 大型回填土

土柱,约 32 t 重),增加了土壤地下水位模拟控制装置。20世纪90年代中期,CERN鉴于蒸发测定的重要性,考虑到禹城站的蒸渗仪具有国际先进水平,并得到了CERN专家组的充分肯定,决定由水分分中心负责在几个重点生态站推广和配备这一设备。1994—1996年,在唐登银研究员的领导下,孙晓敏等组成了一支仪器建设队伍,在黑龙江海沦站、内蒙古草原站、奈曼站、河北栾城站、河南封丘站、江西鹰潭站、青海海北站建设了7台同一规模的大型称重式蒸渗仪($3\text{ m}^2\times 2\text{ m}$)。2008年,又为中国地质科学院水文地质环境地质研究所建造了一台大型土壤蒸发渗漏仪,是目前中国具有原状土体最深的一台大型土壤蒸发渗漏仪($3\text{ m}^2\times 6\text{ m}$ 大型原状土土柱,约 36 t 重)。

在水分分中心建造的大型蒸渗仪基础上,利用这些仪器观测的数据,许多科学家从事了相关的科学研究,这些研究包括对蒸发过程的测量与评价^[7],不同作物不同生育阶段耗水规律的分析^[8],以及多年耗水规律的揭示^[9];还有利用大型蒸渗仪揭示和模拟农田土壤水和地下水的交换过程规律^[10-11],及作物根系吸水过程特征^[12];大型蒸渗仪数据亦可为模拟和标定SVAT过程模型参数提供许多支撑^[13]。水分分中心对大型蒸渗仪的推广应用为相关学科更深层次的科学研究起到了重要作用。

1.3 涡度相关技术的应用

涡度相关技术是目前公认测定近地表层 CO_2 和水热通量的标准方法,所观测的数据得到微气象学、水文学、地理学和生态学家们的广泛认可,并已经成为检验各种模型估算精度的权威资料^[14]。水分分中心对涡度相关技术在中国的引进吸收、观测研究和应用发展等方面起着重要的引领作用。

早在1990年,陈发祖研究员和日本冈山大学科学家开展合作研究,研究组获得了具有国际领先水平的通量观测仪器,包括三维的超声风速温度仪(DAT-600, KAIJO, 日本)和快速反应的 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 红外分析仪(Advanet-E009, 日本)。在此之前,陈发祖研究员组织研制了中国第一台 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 脉动测定仪(1989年),研究组携上述仪器参加了HEIFE实验^[15],利用国外的 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 脉动测定仪和自行研制的同类仪器,在中国第一次实现了采用涡度相关技术对生态系统尺度的光合速率开展“对比”和“梯度”观测。20世纪90年代中后期,在国家自然科学基金的支持下,先后在山东禹城农田、甘肃张掖绿

洲、内蒙古草原、淮河流域和西藏高原等生态系统进行了一系列短期观测研究,在中国首次使用涡度相关系统进行通量显热通量、水汽通量和CO₂通量的野外观测并取得了一系列的科研成果^[16-18],特别是首次得到了青藏高原农田生态系统水分利用效率日变化曲线^[19]。同时与张仁华研究员共同合作,运用定量实验遥感方法和涡度相关技术结合,提出了利用遥感数据估算植被吸收CO₂的模型,做出了中国第一张华北地区CO₂通量的分布遥感图^[20]。

进入21世纪,在中国科学院知识创新工程重大项目和973项目的支持下,水分分中心直接参与了中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)近10年的建设与发展。ChinaFLUX利用涡度相关技术开展不同生态系统CO₂和水热通量观测研究,全面实现和提高了中国对典型陆地生态系统CO₂和水热通量的综合观测研究的能力^[21],水分分中心在其中发挥了重要作用。中国通量网的能力建设是中国进行通量观测研究的重要里程碑,在水分分中心孙晓敏研究员的带领下,通过大量的调研,提出了高起点和跨越式的建设发展思路,引进了当时国际上最先进的仪器设备,并随后在中国选择了8个台站建立了CO₂和水汽等通量涡度相关的长期观测系统。以ChinaFLUX观测数据为基础,在这个平台上发表了百余篇SCI论文,二百余篇CSCD论文。其观测系统集成、数据质量控制和数据管理与综合研究的能力达到了国际先进水平,并引领了中国区域碳通量观测事业的发展,通过中、日、韩三国国际合作(CarbonEastAsia)项目的实施,实现了共建亚洲区域碳水通量网络的发展目标。

为有效地推进这一技术和数据的应用,水分分中心特别在涡度相关数据后处理,特别是通量方法学的研究方面开展了深入的研究。首先,基于涡度相关技术测定植被/大气间CO₂和水热通量,以3个台站(长白山,千烟洲和禹城)的高频原始数据为例,利用Ogive函数确定适宜的平均周期^[22],提出了确定适宜的涡度相关数据平均周期时需要考虑生态学和微气象学的相关原则:①可以分辨CO₂和水热通量的日变化特征;②可以分辨短周期的零星事件的影响;③可以捕捉大部分低频通量成分。结果表明,在长期CO₂通量研究中,平均周期30 min是适宜的。但对于森林地区(如长白山和千烟洲),应该适当延长平均时间可得到更加准确的通量结果,特别需要量化研究平均周期60 min和120 min对森

林碳平衡特征的影响^[23-24]。其次,从微气象学的理论讲,在地势平坦、植被冠层均质且开阔条件下的通量观测站上所获得的涡度相关CO₂和水热通量数据是最值得信赖的^[25-26],但是,在现实的陆地生态系统中难以完全满足涡度相关技术的基本假设条件,从而导致CO₂和水热通量的测定值存在着一定的不确定性^[26-27]。水分分中心针对这一问题,通过介绍国外流行的坐标旋转校正方法,并以4个不同台站的数据为例,具体分析了不同的校正方法对通量结果的影响^[28]。最后,针对夜间观测数据问题,由于夜间湍流交换弱,在夜间观测的涡度相关数据存在较大的不确定性和误差,在分析国外关于夜间数据处理方法的基础上,提出了一个改进和简化的方法(平均值比较法)来评估夜间数据的可靠性,保证了数据评估方法的一致性^[29]。

1.4 热红外定量实验遥感方法的应用

实验遥感方法是将地面遥感观测塔与卫星遥感信息结合起来,定量研究遥感信息并构建具有物理基础的定量遥感模型的一种遥感研究方法。它可将地面遥感信息与卫星遥感信息相结合,为卫星遥感信息的应用提供坚实的地面基础和物理机制,是遥感技术发展的一个重要方向。水分分中心是中国最早开展热红外定量实验遥感的单位之一,当时根据学术动态和地理所的需要,左大康所长果断决策,唐登银站长积极支持,将传统的研究地表蒸散的微气象学与遥感方法结合起来,在禹城试验站同时建立60 m通量观测塔和30 m高的高塔遥感平台。在特殊的国情下,运用投入少的资源节约型的高塔遥感平台,长期连续开展多时相、多角度、多光谱观测,在进行地物波谱研究的同时,根据禹城综合试验站的水循环研究方向,在禹城站遥感试验场的30 m高塔遥感平台上获取卫星相同波段的多光谱模拟遥感信息,在高塔四周构建8种不同土壤水分和作物长势,获取应用目标信息,从而能够有效开展节约型的土壤水分、地表蒸散、作物缺水和作物估产遥感建模试验。事实证明这种具有中国特色的遥感试验场,在建立遥感作物估产模型、遥感土壤水分模型、遥感地表蒸散模型等方面起到了重要作用,发展了中国的热红外定量实验遥感并取得了一批科研成果^[30-32]。

在进行高塔遥感观测的同时,水分分中心还研制和创新了一系列的仪器设备和方法,用来改进地面实验遥感中的观测^[33-35],这些设备包括:①针对真

实地物的热红外比辐射率测定技术,发展了运用热像仪观测的方法研究微尺度(分米尺度)地物的基本属性(辐射温度)、基本定义(比辐射率等)和基本定律(布朗克定律)的尺度效应,建立了野外和模拟遥感试验场,开展了星—地协同的同步观测;②研制开发了一个用于热红外多角度遥感的实验室模拟装置;③研制开发了3种不同方式的以红外温度计为检测器的热红外比辐射率测定装置,可以分别运用于室内实验和野外实验;④研制开发了漫射热辐射源物体方向比辐射率测量测定装置,解决了漫射热辐射源物体方向的比辐射率测量的技术难题,实现了野外连续多角度的地物比辐射率快速测量(被动测量),这是航空航天遥感平台直接实时测量地物比辐射率是热红外遥感界一直追求和奋斗的目标;⑤研制开发了利用CO₂激光测定地物的方向比辐射率的地面试验和测定装置;⑥解决了准直热辐射源物体方向比辐射率测量方法问题,研制了观测仪器,实现了室内连续多角度的地物比辐射率的快速测量(主动测量);⑦设计了一种结构简单,易于拆卸安装的可用于野外的地物辐射全方位多角度的测定平台,可以方便地用于野外的近地面遥感测量,用于遥感方向性定量模型研究。

实验遥感方法研究与禹城试验站的旱涝碱综合治理、农田蒸散与水量平衡研究相结合,产出了一大批研究成果。陈述彭先生评价,地理所的实验遥感在全国的遥感界独树一帜。这些研究成果奠定了《定量热红外遥感模型及地面实验基础》的出版^[36],该书是实验遥感研究的总结之作,也是中国实验遥感研究的经典著作。

1.5 大孔径闪烁仪技术的应用

对生态系统通量的观测研究,目前大部分都是局限于一个“点”进行,如前面介绍的涡度相关方法,其观测的通量能代表仅仅是测点附近几十到几百米范围内的状况。为了研究更大范围(如区域尺度)内的生态系统交换,仅仅靠有限的“点”观测来简单推算更大范围的通量显然是有很大的误差。利用遥感模型结合遥感数据是实现由点到面进行尺度扩展的最有效的方法,但是遥感方法本身并不能直接测量下垫面的各种通量。为了对扩展区域中的部分像元结果进行地面定标以及对反演的结果进行实验验证,像元尺度的通量观测是解决上述问题的最好方法之一。

大孔径闪烁仪(Large Aperture Scintillometer,

LAS)是目前可以直接测量像元(km)尺度非均匀下垫面显热通量的唯一仪器,是实现传统地面通量的尺度扩展以及遥感通量地面验证的最好方法。为此,水分分中心于2002年率先利用从荷兰购买的两套LAS仪器,并且于2003和2004年在北京小汤山农田上(下垫面相对均匀)进行了连续观测,为了验证LAS的可靠性,同时还进行了包括涡度相关在内的微气象观测。对比分析两种方法得到的显热通量,结果表明:两者之间的变化趋势非常一致,平均相对误差为12.2%,基于LAS的观测结果,结合遥感数据和模型,我们还首次获得了华北平原的感热通量区域分布图^[37]。

2009年,利用新的LAS仪器在山东禹城农田进行了显热通量观测,其结果和涡度相关的结果进行了比较,研究重点是分析LAS在观测中的不确定性和误差。理论分析和实际的观测结果表明,无论白天还是夜间,用LAS测量像元尺度上的显热通量(H_{LAS})是可行的,与涡度相关方法得到的结果(H_{EC})总体相关性比较好,日变化趋势非常一致,两者之间的绝对误差一般小于 $\pm 50 \text{ Wm}^{-2}$ 。当白天显热通量较小时, H_{LAS} 比 H_{EC} 偏大,反之则 H_{LAS} 偏大。其误差和不确定性的可能原因:下垫面的非均匀性,风速风向变化将会改变两者通量贡献区(Footprint)的范围。另外,其他参数(如波文比,零平面位移和地表粗糙度等)的不确定性都可能影响LAS的观测结果^[38]。这些研究结果为LAS的应用提供了重要基础。

1.6 稳定同位素技术的应用

由于同位素效应的存在, H_2^{18}O 和 HD^{16}O 成为土壤、植被、大气和海洋间不同形式水分运动的良好示踪剂,成为涉及大气、水文和生态等多种学科的重要研究工具。测定液态、气态和固态水稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 可提供大量有关大气水汽来源区域、大气中水相变过程的重要信息,以及流域水循环过程的示踪等。传统的水稳定同位素信息由于受到采样与分析仪器和技术的限制,大多局限于较大空间尺度水分运动规律和较粗时间分辨率的条件,对于田间尺度的水分运动过程和水碳通量研究的同位素应用,则依赖于新方法和技术的发展。

2004年,在水分分中心的主导下,地理所引进了德国Finnigan公司生产的最新型稳定同位素比值质谱仪MAT253,开始了稳定同位素技术在田间尺度的生态系统水文过程研究的技术应用。通过

在禹城站的实验观测分析,提出了一个简化的土壤水同位素混合模型,揭示了作物根系吸水的空间分布特征,是国内应用同位素技术在农田 SPAC 水分运动过程研究较早的成果之一^[39]。

高时间分辨率、连续的大气水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 同位素比值和通量数据将为陆地生态系统水循环(包括植物蒸腾和土壤蒸发过程)及其相关的大气过程,特别是涉及相变过程的科学研究提供更多有价值的信息,也将促进氢氧稳定同位素技术在水文学、大气学和生态学等相关领域中的广泛应用。2006年,CERN水分中心引进国际上第一台水汽 H_2^{18}O 、 HD^{16}O 和 H_2^{16}O 激光稳定同位素气体分析仪(TGA100A, Campbell Scientific Inc., USA),并在此基础上,与美国耶鲁大学森林与环境学院 Xuhui Lee 教授合作开发了大气水汽 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 和D/H在线标定系统,改进原有两点校正为三点校正,利用样品和旁路气泵设计剔除歧路管压力变化的影响等问题,解决了仪器非线性响应难题,成功构建了大气水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 同位素比值和通量的原位连续观测系统,其观测精度(小时尺度)可以达到甚至优于同位素质谱仪(Finnigan MAT253)的观测精度,具备了大气水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 同位素比值和通量的原位连续观测能力^[40]。

目前水分中心对TGA100A水汽同位素原位连续测量系统的野外应用一直在进行中,取得了一系列的原创性成果。2006—2007年首次实现了北京大气水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 原位连续观测研究,探讨了大气水汽和降水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和过量氘($d=\delta\text{D}-8*\delta^{18}\text{O}$)的变异特征及其环境控制^[41]。2008年在栾城农田生态站完成了对冬小麦和夏玉米的土壤—植物—大气系统水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 同位素比值和通量原位连续观测实验,首次实现了大气水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的原位连续观测及其与涡度相关相结合的技术实现,并在此基础上展开多项有关蒸散分割的研究^[42-43]。2009年在内蒙多伦草地生态定位研究站对草原生态系统开展土壤—植物—大气系统水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 原位连续观测实验。

CERN水分中心已拥有了基于WC-CRDS和OA-ICOS技术的Picarro公司和Los Gatos Research公司的大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 和水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的稳定同位素仪器。将以大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 稳定同位素仪器和大气水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 稳定同位素仪器为基础,构建大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 和水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的联合观测系统。

水的稳定同位素技术在生态水文过程中的研究正在蓬勃发起,由CERN水分中心在国内的推动与技术引进有力地促进了中国在这一领域的研究工作。

2 生态水文过程模拟研究进展

中科院地理科学与资源所除了致力于生态水文过程野外观测方法和技术的引进、吸收和研究之外,也同时开展了生态水文过程的相关模拟模型研究,尤其是在地表蒸发过程机理与模拟研究方面,长期引领国内的研究研究,CERN水分中心也直接参与了大量的模拟模型研究工作。

蒸发过程的机理与模拟研究一直是地理资源所的传统研究优势。在上一代的科学家中,先后在黄秉维先生、左大康研究员和唐登银研究员的带领下,老一辈科学家们在禹城站、大屯站和栾城站围绕蒸发和地表能量平衡过程开展了大量的研究,出版了如《农田蒸发研究》、《作物与水分关系研究》等一系列经典著作,至今仍然是中国研究蒸发的必读书籍^[44-46],老一辈的研究人员主要在观测方法、手段、以及遥感技术方面做出了杰出贡献,在模拟上也做了初步探索。

进入21世纪,以罗毅研究员(CropS模型)^[47]、莫兴国研究员(VIP模型)^[48]和于强研究员(ChinaAgroSys模型)^[49]的新一代科学家为代表,先后构建了以水碳耦合过程机理为基础的冬小麦光合—蒸散过程模拟模型,成为中国研究土壤—植物—大气系统水碳过程耦合模拟研究的前沿研究成果,进一步确立了地理所在中国蒸发过程模拟研究中的优势地位。目前由上述3位研究员分别构建的冬小麦光合—蒸散过程模型(生态模型或水文模型)分别有所侧重,CropS模型和VIP模型逐渐发展成分布式的生态水文过程模型^[50-51],而ChinaAgroSys模型则在SVAT模型机理基础上,尤其考虑植物水分的动态平衡,将叶片水势与土壤水势联系起来,动态模拟叶片水势过程,从而更好地反映植物水分状况,改善了对气孔及冠层导度的模拟^[52]。

3 发展展望

生态水文过程的研究是揭示生态系统结构与功能,了解水文过程与生态过程的关系,为生态系

统管理和水资源管理服务的科学基础。野外观测生态水文过程是相关研究的基础,CERN水分分中心长期致力于这方面的研究工作,紧盯国际上相关科技的发展,为推动中国在这方面的开展起到了引领作用。总结目前的进展和国际上的最新发展,本文认为,在未来有关生态水文过程的野外观测方法中,有以下几个方向值得关注:

(1) 通量观测技术与同位素原位连续测量技术的结合。同位素技术作为精细分析陆面水、碳交换过程的最新技术,已经开始在国际研究领域展开,它的应用必将为通量过程的分析提供全新的数据和视野,揭示更广阔的科学现象。水分分中心已经初步开展了这方面研究的尝试,有关的理论和方法还有待进一步深入分析。

(2) 点尺度观测与遥感信息的结合。目前的野外观测大多是点尺度的观测,缺乏揭示较大空间尺度生态水文过程的能力,而遥感技术则能较好地反映像元尺度以上的地面信息,是公认的大尺度信息获取的理想工具。当前对陆表生态水文过程的观测方法还很少将这两种观测手段和信息有效结合起来,是未来生态水文野外观测的重要突破方向。

(3) 多点联网长期观测的深化。目前国际上兴起了多个长期联网观测计划,如全球通量网 FluxNet、美国长期生态监测网计划 NEON 等,这些长期联网观测计划对于揭示地球表层系统和生态系统的长期演变规律及其机制具有重要作用。CERN 也实施了生态系统的长期联网观测计划。然而这一观测计划还需要根据技术的进步和科学认识的提高逐步完善,数据的应用也需要深入。

另外,在生态水文过程模拟方面,目前的研究大多集中在农田生态系统水文过程的模拟,对于自然生态系统,尤其是生态水文问题突出的草地和荒漠生态系统,深入的生态水文过程机理与模拟研究在中国还相当缺乏。因此,未来的研究有必要将农田生态系统取得的先进的过程机理模型思想与自然生态系统的特殊性相结合,发展适合不同生态类型的生态水文过程模拟模型,从而应用于流域和区域尺度的生态系统和水资源管理。

参考文献

- [1] 王根绪, 钱鞠, 程国栋. 生态水文科学研究的现状与展望. 地球科学进展, 2001, 16(3): 314-323.
- [2] 王根绪, 刘桂民, 常娟. 流域尺度生态水文研究评述. 生

态学报, 2005, 25(4): 892-903.

- [3] 中国生态系统研究网络科学委员会. 陆地生态系统水环境观测规范. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 6.
- [4] 谢贤群, 王立军. 水环境要素观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [5] 张心昱, 孙晓敏, 袁国富, 等. 中国生态系统研究网络水体 pH 和矿化度监测数据初步分析. 地球科学进展, 2009, 24(9): 1042-1050.
- [6] 唐登银, 程维新, 洪嘉琏. 我国蒸发研究的概况与展望. 地理研究, 1984, 3(3): 84-97.
- [7] 陈发祖, 孙晓敏, 汪西林, 等. 高地下水埋深条件下的农田水热平衡试验研究. 地理研究, 1994, 13(1): 32-42.
- [8] 甘卓亭, 刘文兆. 黄土塬区麦田蒸散特征. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1435-1438.
- [9] 刘恩民, 张代桥, 刘万章, 等. 鲁西北平原农田耗水规律与测定方法比较. 水科学进展, 2009, 20(2): 190-196.
- [10] 杨建锋, 李宝庆, 李运生, 等. 浅地下水埋深区潜水对 SPAC 系统作用初步研究. 水利学报, 1999(7): 27-32.
- [11] Yang J F, Wan S Q, Deng W, et al. Water fluxes at a fluctuating water table and groundwater contributions to wheat water use in the lower Yellow River flood plain, China. Hydrological Process, 2007, 21(6): 717-724.
- [12] Luo Y, Ouyang Z, Yuan G, et al. Evaluation of macroscopic root water uptake models using lysimeter data. Transactions of the ASAE, 2003, 46(3): 625-634.
- [13] 陈建耀, 刘昌明, 吴凯. 利用大型蒸渗仪模拟土壤-植物-大气连续体水分蒸散. 应用生态学报, 1999, 10(1): 45-48.
- [14] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. Global Change Biology, 2003, 9(4): 479-492.
- [15] 朱治林, 陈发祖, 孙晓敏, 等. 绿洲边缘地带温湿风廓线特征及其通量的测定. 干旱区地理, 1995, 18(2): 77-83.
- [16] 朱治林, 孙晓敏, 张仁华. 淮河流域典型地面水热通量的观测分析. 气候与环境研究, 2001, 6(3): 214-220.
- [17] 朱治林, 孙晓敏, 张仁华. 内蒙古半干旱草原能量物质交换的微气象方法估算. 气候与环境研究, 2002, 7(3): 351-358.
- [18] 朱治林, 孙晓敏, 张仁华, 等. 作物群体 CO₂ 通量和水分利用效率的快速测定. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1684-1686.
- [19] Wang S S, Zhu Z L, Sun X M. Characteristics of energy and mass exchanges in the wheat field of Lhasa, Xizang (Tibet). Science in China: Series D, 1996, 39(4): 418-424.
- [20] 张仁华, 孙晓敏, 朱治林, 等. 遥感区域地表植被二氧化碳通量的机理及其应用. 中国科学: D 辑, 2000, 30(2):

- 215-225.
- [21] Yu G R, Wen X F, Sun X M, et al. Overview of China-FLUX and evaluation of its eddy covariance measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3-4): 125-137.
- [22] Sun X M, Zhu Z L, Wen X F, et al. The impact of averaging period on eddy fluxes observed at ChinaFLUX sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3/4): 188-193.
- [23] 朱治林, 孙晓敏, 温学发, 等. 中国通量网(ChinaFLUX)夜间CO₂湍度相关通量数据处理方法研究. *中国科学: D辑*, 2006, 36(增刊I): 34-44.
- [24] Sun X M, Zhu Z L, Xu J P, et al. Determination of averaging period parameter and its effect analysis for eddy covariance measurements. *Science in China: Series D*, 2005, 48 (Supp.I): 33-41.
- [25] Lee X. On micrometeorological observation of surface-air exchange over tall vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91(1-2): 39-49.
- [26] Massman W J, Lee X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long term studies of carbon and energy exchanges. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1-4): 121-144.
- [27] Baldocchi D, Finnigan J, Wilson K, et al. On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 96(1-2): 257-291.
- [28] Zhu Z L, Sun X M, Zhou Y L, et al. Correcting method of eddy covariance fluxes observed at non-flat surfaces and its application in ChinaFLUX. *Science in China, Series D*, 2005, 48 (Supp.I): 42-50.
- [29] Zhu Z L, Sun X M, Wen X F, et al. Study on the processing method of nighttime CO₂ eddy covariance flux data in ChinaFLUX. *Science in China: Series D, Earth sciences*, 2006, 49(2): 36-46.
- [30] Zhang R H, Sun X M, Liu J Y, et al. Determination of regional distribution of crop transpiration and soil water use efficiency using quantitative remote sensing data through inversion. *Science in China. Series D, Earth sciences*, 2003, 46(1): 10-22.
- [31] Zhang R H, Sun X M, Zhu Z L, et al. A remote sensing model for monitoring soil evaporation based on differential thermal inertia and its validation. *Science in China: Series D, Earth sciences*, 2003, 46(4): 342-355.
- [32] Zhang R H, Sun X M, Wang W M, et al. An operational two-layer remote sensing model to estimate surface flux in regional scale: Physical background. *Science in China: Series D*, 2005, 48(AprSI): 225-244.
- [33] Su H B, Zhang R H, Tang X Z, et al. Determination of the effective emissivity for the regular cavities using Monte-Carlo method. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(11): 2313-2319.
- [34] Zhang R H, Li Z L, Tang X Z, et al. Study of emissivity scaling and relative of homogeneity of surface temperature. *International Journal of Sensing*, 2004, 25(1): 245-295.
- [35] Zhang R H. A proposed approach the infrared emissivities of terres: Trial surface from airborne or spaceborne platform. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, 3(3): 591-595.
- [36] 张仁华. 定量热红外遥感模型及地面实验基础. 北京: 科学出版社, 2009.
- [37] Zhu Z L, Sun X M, Xu J P, et al. Using large aperture scintillometer to validate pixel heat flux based on remote sensing models. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, USA*, 2004.
- [38] 朱治林, 孙晓敏, 贾媛媛, 等. 基于大孔径闪烁仪(LAS)测定农田显热通量的不确定性分析. *地球科学进展*, 2010, 25(11): 88-96.
- [39] 苑晶晶, 袁国富, 罗毅, 等. 利用δ¹⁸O信息分析冬小麦对浅埋深地下水的利用. *自然资源学报*, 2009, 24(2): 360-368.
- [40] Wen X F, Sun X M, Zhang S C, et al. Continuous measurement of water vapor D/H and ¹⁸O/¹⁶O isotope ratios in the atmosphere. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(3-4): 489-500.
- [41] Wen X F, Zhang S C, Sun X M, et al. Water vapor and precipitation isotope ratios under the influence of the Asian monsoon climate. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2010b, 115, D01103, doi: 10.1029/2009JD012408
- [42] 袁国富, 张娜, 孙晓敏, 等. 利用原位连续测定水汽δ¹⁸O值和Keeling Plot方法区分麦田蒸散组分. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 170-178.
- [43] 温学发, 张世春, 孙晓敏, 等. 叶片水H₂¹⁸O富集的研究进展. *植物生态学报*, 2008, 32(4): 961-966.
- [44] 左大康, 谢贤群. 农田蒸发研究. 北京: 气象出版社, 1991.
- [45] 谢贤群, 于沪宁. 作物与水分关系研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.
- [46] 牛文元, 周允华, 张翼, 等. 农田生态系统能量物质交换. 北京: 气象出版社, 1987.
- [47] 罗毅, 于强, 欧阳竹, 等. SPAC系统中的水热CO₂通量与光合作用的综合模型(I)模型建立. *水利学报*, 2001, 1

- (2): 90-97.
- [48] Mo X G, Liu S X. Simulating evapotranspiration and photosynthesis of winter wheat over the growing season. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109(3): 203-222.
- [49] Wang J, Yu Q, Li J, et al. Simulation of diurnal variations of CO₂, water and heat fluxes over winter wheat with a model coupled photosynthesis and transpiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3-4): 194-219.
- [50] Luo Y, He C, Sophocleous M, et al. Assessment of crop growth and soil water modules in SWAT2000 using extensive field experiment data in an irrigation district of the Yellow River Basin. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(1-2): 139-156.
- [51] Mo X, Liu S, Lin Z, et al. Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over the Lushi basin. *Journal of Hydrology*, 2004, 285(1-4): 125-142.
- [52] Yu Q, Xu S, Wang J, et al. Influence of leaf water potential on diurnal changes in CO₂ and water vapour fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 124(2): 166-181.

Measuring and Modeling of Ecohydrological Processes: Progresses and Perspectives

SUN Xiaomin, YUAN Guofu, ZHU Zhilin, ZHANG Xinyu, WEN Xuefa, TANG Xinzhai

(Water Sub-Center of CERN, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Water Center of Chinese Ecosystem Research Network (CERN) is a management unit that manages the long-term water environment of CERN field stations, and it is also a scientific research group of the Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research (IGSNRR). Water Center always focuses its research on the application of the advanced measuring methods to ecohydrological processes field observation. The faculties of Water Center have made important progresses in the application of Lysimeter, eddy covariances techniques, experimental remote sensing techniques, large aperture scintillometer applications, and stable water isotope techniques. At the same time, the modeling researches on surface evapotranspiration have also developed from the early empirical model to the mechanism model based on water-carbon coupled processes. The further development of measuring method on ecohydrological processes should place emphasis on the combination of the flux observation technique and the in situ vapor isotopic analyzing technique, and the combination of local measurement and the remote sensing information.

Key words: ecohydrology; Lysimeter; eddy covariance; large aperture scintillometer; stable water isotope; experimental remote sensing

本文引用格式:

孙晓敏, 袁国富, 朱治林, 等. 生态水文过程观测与模拟的发展与展望. *地理科学进展*, 2010, 29(10): 1293-1300.