

不同类型生态系统水热碳通量的监测与研究

王勤学¹, 渡边正孝¹, 欧阳竹², 李彦³, 李英年⁴, 赵新全⁴, 王克林⁵

(1. 日本国立环境研究所, 筑波 305-8506; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 中国科学院新疆地理与生态研究所, 乌鲁木齐 830011; 4. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008;

5. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

摘要: 亚太地区环境革新战略项目 (APEIS) 在中国 5 种主要生态系统类型区 (草地: 海北、耕地: 禹城、稻田: 桃源、林地: 千烟洲、荒漠: 阜康) 建立了一个以连续观测能量、水分和碳素通量为中心, 包括气象、水文、土壤、植被等各项生态要素的监测网络系统, 被称之为 APEIS-FLUX 系统。作者首先对 APEIS-FLUX 系统的观测数据进行了初步分析, 表明该系统稳定可靠, 它可以实时地提供高质量、高精度、长期而连续的通量及生态要素的观测数据。对数据的比较清楚地反映出了不同生态系统类型区的水热碳通量的差异性。其次, 利用 APEIS-FLUX 数据对美国航空航天局 (NASA) 的 MODIS 数据产品进行比较验证后发现, 除部分产品如地表面温度 (MOD11) 等与观测数据较吻合以外, 大部分数据产品如土地覆盖 (MOD12), 叶面积指数 (MOD15) 和光合速率与净第一性生产力 (MOD17) 等都与观测数据相差深远, 有必要对其处理程序和模式进行修正。为此, 我们利用 APEIS-FLUX 的数据作为 MOD15 和 MOD17 的生成模型 (BIOME-BGC) 的输入数据, 并对该模型的有关参数进行了修订。结果表明, 该模式在通过修正后, 可以很好地模拟植被的生长过程及其相应的水热碳循环过程。

关键词: APEIS-FLUX 系统; 水碳通量; MODIS 数据; 陆地生态系统

1 背景与目的

对陆地表面和大气之间的各种通量的交换过程缺乏理解, 将不利于把气候、水文、生态和环境化学等领域的知识有效地运用于解决实际问题 and 决策上。如何将这些学科有机结合起来, 共同为陆地表面过程的研究积累数据和开发综合性数值模拟模式, 已成为国际学术界新的研究热点和重点研究领域 (CEES/IGPO 1994、CEES/USWRP 1994、GEWEX 1993、NASA/NRC 1994、WMO 1994)。在过去十数年间, 通过一些野外实验, 诸如 HAPEX-MOBILHY^[1-4]、FIFE^[5-8]、EFEDA^[9]、HAPEX-Sahel^[10,11]和 BOREAS^[12,13], 将大气科学家、水文学家、生态学家、化学家和遥感研究者汇聚在一起开展研究, 创造了一批综合性研究的典范。但是, 这些实验研究大都集中在数月和一个生长季的综合观测的基础上, 不能满足季节性和年际间动态变化的研究需要。

近几年, 在北美和欧洲等地对水、热和碳通量的观测密度和频率大大增加了。许多国家和国际组织的研究计划都将研究目标定位到如何更好地理解陆地表面过程和边界层

收稿日期: 2003-09-07; 修订日期: 2003-11-26

基金项目: 亚洲太平洋地区环境创新战略项目环境综合监测子课题 [Foundation Item: Integrated Environmental Monitoring (IEM) Subproject, the Asia-Pacific Environmental Innovation Strategy Project (APEIS)]

作者简介: 王勤学 (1965-), 男, 1989 年获北京师范大学自然地理学专业硕士学位后, 就职于中国科学院自然资源综合考察委员会从事气候学研究及《自然资源学报》的编辑工作。1994 年赴日本北海道大学地球环境科学研究科攻读博士学位。1998 年获博士学位后, 曾任北海道大学, 北海道教育大学的外国人研究员以及在日本国立环境研究所从事博士后研究工作。现任该研究所流域圈环境管理研究项目主任研究员。主要从事于流域生态过程的监测与模拟研究。E-mail: wang.qinxue@nies.go.jp

过程上。例如，全球能量和水循环实验计划 (GEWEX) 的大洲尺度上国际研究项目 (GCIP) 就提出把小流域精确计算的流量扩展到 GCM 的坐标方格中，用来估算大洲尺度上的水循环 [14]。除此之外，国际卫星云气候学计划 (ISCCP) 也开展通量、边界层和云盖的观测实验，为校正卫星遥感数据而积累地面观测数据。这些试验又进一步得到了被称为地表面参数化模式的相互比较研究 (PILPS) 项目的强化，其目的是利用地-气相互作用的数据对各种地表面过程的模型进行验证 [15-17]。国际地圈和生物圈计划 (IGBP) 也试图将研究区从生态系统的规模扩大到地区和全球范围。然而，没有哪一个单一的研究项目可以投资部署如此庞大的观测仪器。在此形势下，一个被称之为 FLUXNET 的以微气象观测塔为主题的全球观测网络系统形成了 [18,19]。该系统主要使用涡度相关法观测陆地生态系统和大气之间的 CO₂、水蒸气和热通量。目前，已有 200 多个观测站点加入了这一网络系统。其目的主要是探讨不同时空尺度上的水、热和碳通量及其循环过程的自然和人为调控机制；同时，也是为了对美国航空航天局 (NASA) 发射的地球观测卫星上的传感器所产生的诸如蒸发量、植被的能量吸收率和生产率等数据产品的验证而提供数据。然而，这 200 多个观测站点大多集中在欧美等国，在中国该项目执行前仅有 1 个站点，很显然，它不可能代表如此巨大而复杂的地区。

作为“亚太地区环境创新战略项目 (APEIS) 的重要组成部分，我们在中国 5 种主要生态系统 (草地：海北、耕地：禹城、稻田：桃源、林地：千烟州、荒漠：阜康) 中建立了先进的通量观测系统，对以能量、水分和碳素通量为中心，包括气象、水文、土壤、植被等各项生态要素进行长期而连续的观测 [20]。因系统是由 APEIS 项目所建，故称为 APEIS-FLUX 系统。与此同时，APEIS 项目还引进了 NASA 开发的 MODIS 数据处理系统，对该项目在新疆和北京所建的卫星数据地面接收站所接收的原始图像数据进行加工处理，得到一系列被称为 MOD 的高级数据产品 [21]。根据用途，这些数据产品可被分为大气、海洋和陆地类 3 大类型。其中陆地类数据产品包括：地表反射率 (MOD09)、地表温度 and 辐射率 (MOD11)、土地覆盖 (MOD12)、植被指数 (MOD13)、叶面积指数 (MOD15) 以及光合速率与净第一性生产力 (MOD17) 等一系列重要的生态要素。本研究将通过陆地生态系统的水、热和碳通量 / 循环过程的综合观测、得到高精度的生态系统观测数据，以此对 MODIS 高级数据产品进行比较和验证，从而得到大区域上的高质量、高精度、长期而连续的生态要素数据库。利用该数据库，本项目将试图阐明不同陆地生态系统类型 (森林、草地、旱地、水田和荒漠) 水、热和碳循环过程的生物物理机理与特征。其次，基于土地利用、土壤类型及社会经济数据，阐明陆地生态系统中水、热和碳循环的自然的和人为因素的驱动机制，并开发陆地生态系统水、热和碳循环的动力学综合模型。最后，利用生态系统模型方法评估和预测未来气候变化、土地利用 / 覆被变化以及人类生产活动对水热通量及碳循环的影响 (图 1)。

作为上述研究的一部分，本文将首先介绍该项目所建立的通量观测系统 (APEIS-FLUX) 的结构、功能和设计思想；其次，利用该系统所观测的

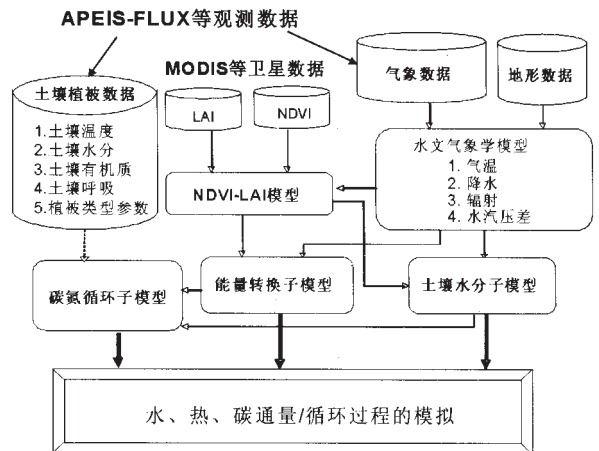


图 1 陆地生态系统动力学综合模型的框架

Fig. 1. Diagram of an integrated terrestrial ecosystem dynamic process model

表 1 中国 5 处生态试验站自然环境

Tab. 1 Natural conditions of five ecological experimental stations in China

站名	地点	地貌	经纬度	气候带	生态类型	年均温 (°C)	年均降水 量 (mm)	无霜期 (d)
海北站	青海	高原	101°12'E 37°29'N	高寒带	高寒草甸 草原	-2.0	580	<30
禹城站	山东	平原	116°36'E 36°57'N	暖温带	灌溉农田	13.1	582	200
桃源站	湖南	丘陵	111°27'E 28°55'N	亚热带	水田	16.5	1447.9	285
千烟洲	江西	丘陵	115°04'E 26°44'N	亚热带	人工林	17.8	1308.7	290
阜康站	新疆	平原	87°45'E 43°45'N	中温带	干旱荒漠	6.6	164	174

通量数据, 对中国不同生态系统类型的水热碳通量进行比较, 揭示不同生态系统的差异性; 再次, 利用高精度的观测数据对 MODIS 陆地类高级数据产品进行比较和验证。最后, 利用 APEIS-FLUX 数据对一个用于处理 MODIS 数据产品 (LAI 和 NPP) 的生态系统模型 (BIOME-BGC)^(22,23) 的模拟效果进行验证。

2 APEIS-FLUX 监测系统

2.1 站点的选取与建设

APEIS-FLUX 的 5 个站点分别设在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站、禹城农业综合试验站、桃源农业生态试验站、千烟洲红壤丘陵综合开发试验站和阜康荒漠生态系统观测试验站内 (表 1、图 2)。

2.2 监测项目

APEIS-FLUX 是一个实时的监控系统。我们可以在任何地方通过卫星电话系统对观测系统进行遥控和下载数据。观测数据包括由涡度相关法观测的 3 维风向和风速、潜热、

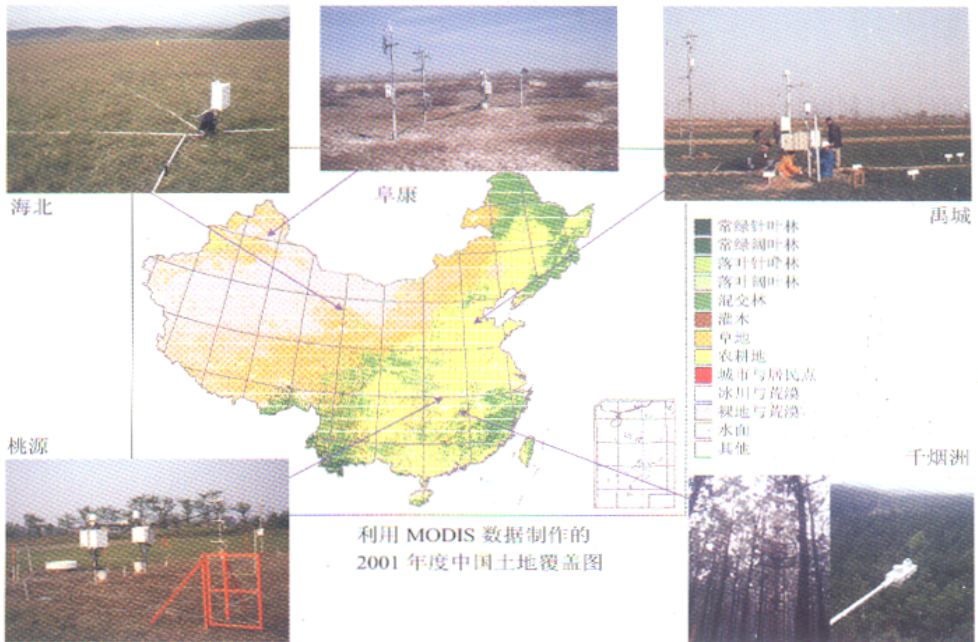


图 2 APEIS-FLUX 地表生态系统监测网络系统

感热和 CO_2 通量、以及包括气温、湿度、太阳辐射、净辐射、蒸发散等一系列微气象观测值；土壤方面的观测值、包括不同土层的温度和湿度、土壤质地、有机质含量以及盐碱度；植被方面包括叶面积指数、气孔阻力、光合速率、地上和地下生物量以及根系密度等；最后，对地下水位及其含盐量也进行了观测。观测项目及使用仪器如下：

(1) 辐射观测项目：总辐射 / 热电堆型辐射仪 (CM21, Kipp & Zonen)、光合有效辐射 / 光量子计 (CLI-190SB-B, Campbell Scientific, Inc.)、短波和长波辐射·净辐射 / 净辐射计 (CPR-CNR1-H, Kipp & Zonen)、地表面辐射温度 / (CPR-CNR1-H, Kipp & Zonen)。

(2) 气象观测项目：风向·风速 / 风向风速计 (CPR-020C & CPR-010C, MET ONE)、气压 / 静容量压力计 (CVS-PTB210)、气温 / 阻抗性测温计 (CVS-HMP45D, 强制通风型, VAISALA)、湿度 / 高分子静容量型湿度计 (CPR-034A, CVS-HMP45D, 强制通风型, VAISALA)、冠层温度 / 红外辐射温度计 (CML-505, Minolta; CML-303F, Minolta)、降水量 / 翻转型雨量桶 (COT-34T, Ota)。

(3) 土壤观测项目：地温 / 阻抗性测温计 (CPT-10, Campbell Scientific, Inc.)、土壤热流量 / 热流板 (CPR-PHF-01, Campbell Scientific, Inc.)、土壤水分 / 时域反射仪 (TDR-CS615, Campbell Scientific, Inc.; TDR-PR1/6, Delta-T Devices Ltd)、水面蒸发量 / 1m 直径蒸发皿及蒸发仪 (CSN-M11, Campbell Scientific, Inc.)、蒸发散量 / 蒸发散仪 (CNK-NS10)

(4) 涡度相关法通量观测项目：三维风速·风向、摩擦速度、温度 / 三维超声波风速温度计 (CKJ-540, KAIJO)、 CO_2 ·水蒸气浓度 / 非分散型红外分析计 (C-CS7500, Campbell Scientific, Inc.)、连续测量取样周期 10Hz、平均花时间 30 分。

(5) 地下水观测项目：地下水位 / 地下水位仪 (CDK-940-10-30)、地下水盐度 / EC 盐度计 (C-C547+A547)

(6) 植被测量项目：光合速率、气孔阻力 / (LI6400, LI-COR Inc., USA)、叶面积指数 / (C-LAI2000, LI-COR Inc.)、树干流 / 树干流计 (CUP-SFM, UP GmbH, Cottbus)、生物量、根的密度 / 称重法、取样调查周期 / 8 天。

数据记录方法 / 专用数据采集器 (CR23X, Campbell Scientific, Inc.)、数据传输方法 / PC 或无线电话 (Siemens)。

2.3 数据处理方法

根据研究目的，我们在不同层次上对数据进行了处理。首先，为了对不同类型生态系统的水、热、碳通量进行对比分析，我们利用波文比法和能量平衡空气动力学阻抗法的计算结果对涡度相关法的观测结果进行比较，从而对仪器的观测精度进行了验证。其中，能量平衡空气动力学阻抗的计算公式为：

$$LE_{dyn} = R_n - G - \rho C_p \frac{T_c - T_a}{r_{bh} + r_{ac}} \quad (1)$$

式中： LE 为潜热通量； R_n 为净辐射； G 为土壤热通量； ρ 为空气密度，取 1.27； C_p 为空气定压比热，取 1013； T_c 和 T_a 分别为冠层温度和气温； r_{bh} 和 r_{ac} 分别为剩余阻抗和空气动力学阻抗。

中性层结下，空气动力学阻抗 r_a 为，

$$r_a = \frac{1}{u_* k} \left(\ln \frac{z - d}{z_0} \right) \quad (2)$$

式中： u_* 为摩擦风速； k 为卡曼常数，取 0.41； z 为参考高度； d 为零平面位移，取冠层平均高度的 2/3； z_0 为粗糙度，取冠层平均高度的 0.13 倍。

对于非中性层结，需要对中性层结下的空气动力学阻抗进行校正。

$$r_{ac} = r_a + \frac{\phi H}{u_* k} = r_a \left(1 + \frac{\phi H}{\ln \frac{z-d}{z_0}} \right) \quad (3)$$

式中： ϕH 为大气层结稳定度函数，

$$\begin{cases} \phi H = \left(1 - 16 \frac{z-d}{L} \right)^{-\frac{1}{2}}, & (z-d)/L < -0.03 \text{ (不稳定时)} \\ \phi H = \left(1 + n \frac{z-d}{L} \right), & \begin{cases} (z-d)/L > 0 \text{ (稳定时)} \\ -0.03 < (z-d)/L < 0 \text{ (微弱不稳定)} \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

式中： L 为 Monin-Obukhov 混合长度； z 为参考高度； n 为经验系数，在时 $\frac{z-d}{L} < 0$ ，取 $n = 4.5$ ， $\frac{z-d}{L} > 0$ ，取 $n = 5.2$ 。式 4 中的 Monin-Obukhov 混合长度采用下列公式计算，

$$L = \frac{u_* T_c}{kg \frac{T_2 - T_1}{u_2 - u_1}} \quad (5)$$

式中： T_c 为气温，绝对温度； k 为卡曼常数，取 0.41； g 为重力加速度，取 9.8； T_2 和 T_1 分别为 2 个高度上的温度； u_1 和 u_2 为 2 个高度上的风速。

摩擦风速计算公式为：

$$\frac{u_*}{k} = \frac{\bar{u}}{\ln \frac{z-d}{z_0}} \quad (6)$$

剩余阻抗采用陈镜明的简便计算模式^[24]：

$$r_{bh} = \frac{4}{u_*} \quad (7)$$

该方法需要用到下面的数据：冠层平均高度，冠层上方两个高度的温度和风速，冠层的红外温度，净辐射和土壤热通量数据。这些数据均取自微气象和涡度相关系统采集的 5 月份的微气象数据。冠层上方温度和风速的高度分别为 1 m 和 3 m，土壤热通量为 3 个热流板测量值的平均值。5 月份，冬小麦冠层的高度已经稳定在 0.696 m，小麦的株高已经达到最高点，小麦处于开花、灌浆、结实阶段，蒸散发旺盛。

在上述 3 种方法计算的潜热通量的相关关系中 (图 3)， LE_{dyn} 、 LE_{bw} 和 LE_{eddy} 分别为能量平衡空气动力学阻抗法、波文比法与涡度相关法计算的潜热通量。结果表明，尽管数据样本数很大 ($n = 1488$)，但各种方法之间具有很高的相关性 (LE_{dyn} 和 LE_{bw} 的相关系数为 0.9578， LE_{dyn} 和 LE_{eddy} 的相关系数为 0.9065， LE_{bw} 和 LE_{eddy} 的相关系数为 0.8838，均在 $\alpha = 0.001$ 的水平上通过极显著性检验)，这说明了观测系统的稳定性和精确

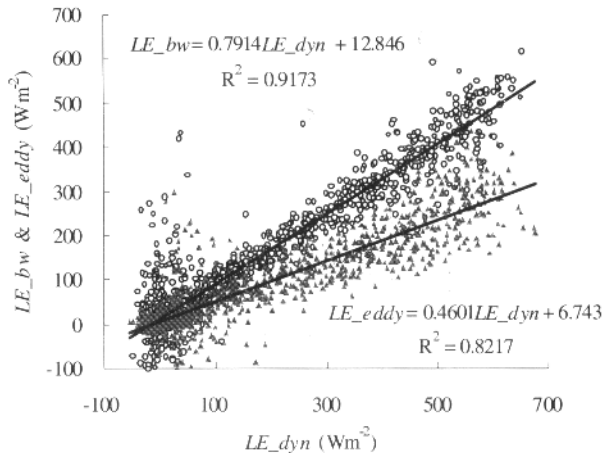


图 3 各种方法计算的潜热通量的相关关系 (以 2002 年 5 月禹城站综合试验场冬小麦冠层为例)

Fig. 3 Correlation of latent heat fluxes estimated with different methodologies (over a winter-wheat canopy in May, 2002 at Yucheng)

性。值得说明的是,利用涡度相关法观测的水热通量值总体上偏小,一方面说明了植被层对一部分能量的贮存,另一方面还有部分能量在水平方向有流失,还与其他 2 种方法的过大评价有关。这一现象在国际上已有很多研究^[25]。

其次,MODIS 的高级数据产品,诸如地表面温度、叶面积指数、光合有效辐射中植被的吸收率和光合速率等是分别在 1 天、8 天、16 天和 1 个月等不同的时间分辨率和 500 m、1000 m 的空间分辨率上被加工处理的。为此,为进行比较验证我们将相应的观测数据如地表面温度,光合有效辐射,叶面积指数等也在相对应的分辨率上进行了处理。关于空间分辨率的问题,因 MODIS 数据代表的是一个面上的平均状态,故我们在观测时采用多点观测的方法然后取平均值。如我们在海北站约 4 km² 的范围内共设有 13 个观测点,而其他各站点也都在 3 点以上采样,取其平均值代表空间上的观测值用于对 MODIS 数据的验证。最后,为了对 BIOME-BGC 的模拟效果进行验证,我们还按照该模型对输入数据的要求,对 APEIS-FLUX 数据进行了处理。该模型的输入数据为日平均的最大、最小和平均温度、降水量、饱和水汽压差、太阳辐射以及白天日长等。

3 数据分析结果

3.1 典型陆地生态系统水、热、碳通量的对比

APIES-FLUX 的第一项任务是通过森林、草地、旱地、水田和荒漠等不同生态系统的水热碳通量及其循环过程特征进行比较,从而揭示典型生态系统中各种通量的时空分异规律的基本特征,为陆地生态系统水热碳循环格局的分析和建立模型提供基础数据。通量观测经过对仪器的校正,数据的采集、整理和补缺,得到了 30 分间隔的完整的时间序列数据。作为数据之例,从禹城站 2002 年度 30 分钟间隔的水热碳通量的季节变化可以看出(图 4),6 月初以前的小麦生育期和 7 月中到 9 月底的玉米生育期间的水汽通量(LE)和 CO₂ 通量都很大,而在小麦收割期到玉米播种期的 6 月份和 10 月以后的冬季期间,感热通量(H)则较大,与此同时,在此期间的 CO₂ 通量较小。这一观测结果完全符合当地的实际情况,进一步说明了观测系统的可靠性。

为了进一步比较各典型生态类型区的水热碳通量的差异性,我们选择桃源、禹城和阜康 3 个站点 4 月 10 日(代表春季)和 8 月 22 日(代表夏季) 2 天的数据进行对比分析(图 5)。这 2 天均为晴天,而且各站的太阳总辐射几乎相等。然而,因地表面覆盖状况不同,各种通量表现出完全不同的特性。其中代表干旱荒漠区的阜康站,净辐射通量、水汽通量和 CO₂ 通量均小于代表稻田生态系统的桃源站和代表灌溉农田生态系统的禹城站。而阜康站的感热通量却远大于其他 2 站,尤其是夏季,这里地面干燥,空气湿度低,导致能量主要以感热的形式存在。与此相反,位于稻田生态系统的桃源站水汽通量却大于其他两站。夏季,桃源站白天的水汽通量比禹城站大将近 1 倍左右,而比阜康站大近 10 倍。CO₂ 通量则完全取决于地面的植被状况,4 月份桃源站还没插秧,地面几乎是水面,故 CO₂ 通量很小,与阜康站荒漠植被的 CO₂ 吸收量几乎相等。相反,这时候的禹城站,冬小麦已进入生长旺期(叶面积指数为 4.4),白天对 CO₂ 的吸收量和夜晚的排放量均大于其他 2 站。到了 8 月份,禹城站的玉米生长到了最旺季(叶面积指数为 3.9),对 CO₂ 的吸收量和排放量均为最大。同期桃源站上的水稻也已经到了拔节期(叶面积指数为 2.4),对 CO₂ 的吸收量和排放量也较大。阜康站的 CO₂ 的吸收量和排放量与其他 2 站相比要小的多,但是,8 月份的荒漠地上也因一些灌丛类植被的生长,对 CO₂ 的吸收量和排放量较 4 月份也有所增加。

3.2 陆地生态系统水热碳量分布的遥感反演

APIES-FLUX 的第 2 项任务是确定利用 MODIS 卫星数据反演水热碳循环相关参数的

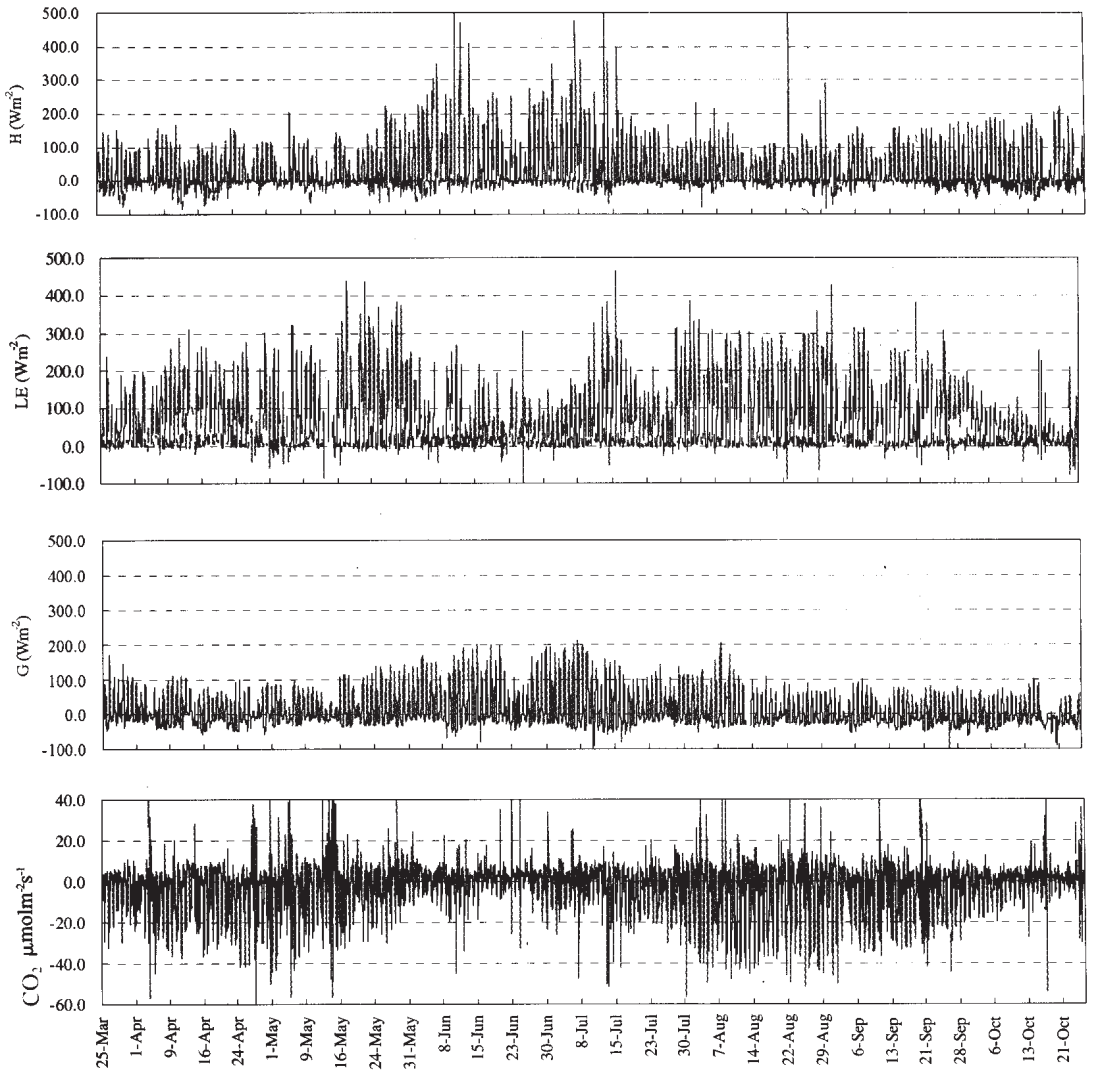


图 4 禹城站 2002 年度冬小麦和玉米生长期的感热 (H)、潜热 (LE)、土壤热通量 (G) 和 CO₂ 通量的季节变化 (数据的时间间隔为 30 分)

Fig. 4 Observations of sensible heat flux (H), latent heat flux (LE), soil heat flux (G) and CO₂ flux during the growing period of winter-wheat and corn in 2002 at Yucheng Ecological Experimental Station (data record time interval is 30 mins)

方法论, 建立适合亚太地区的陆地生态系统的遥感反演模型, 从遥感的角度给出陆地生态系统水热碳量的分布格局。本项目从 NASA 引进的 MODIS 数据处理系统可以产生包括地表面反射率 (MOD09)、地表面温度和辐射率 (MOD11)、土地被覆 (MOD12)、植被指数 (MOD13)、叶面积指数和光合有效辐射中植被的吸收率 (MOD15) 及植被的净第一性生产力 (MOD17) 等一系列重要的生态系统参数, 这些参数将作为遥感反演模型的输入值, 从而估算出陆地生态系统的水热碳量的分布。图 2 中给出了由 MODIS 数据制作的 2001 年的 1 km 栅格的中国土地覆盖图; 图 6 是 2001 年全国范围 1 km 栅格的叶面积指数 (MOD15) 的季节变化分布图。为了与各站点的观测值进行比较, 我们利用 GIS 技术将各站点用 GPS 测定的精确地理位置与上述 MODIS 的数据产品加以套合, 提取出各站点上不同生态指标的时间变化值。

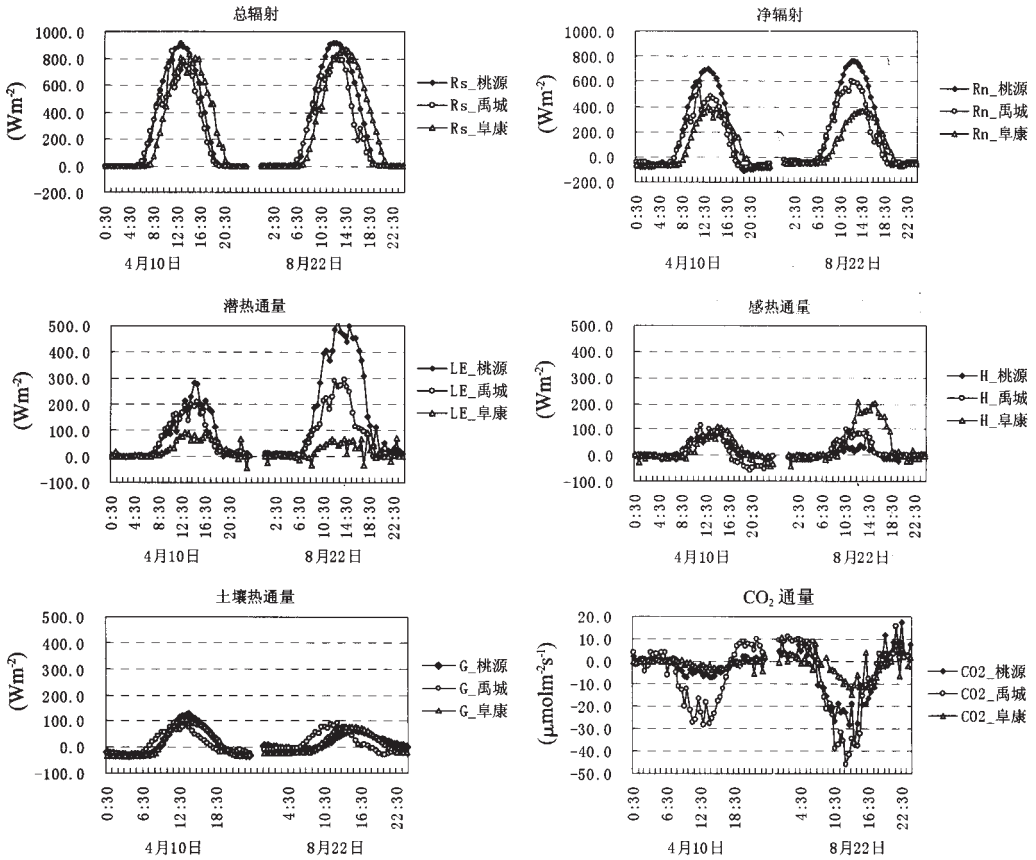


图 5 各站点水热碳通量的比较 (2002 年 4 月 10 日代表春季, 8 月 22 日代表夏季)

Fig. 5 Comparison of water, heat and CO₂ fluxes among different stations (April 10, 2002, and August 22, 2002)

利用 APEIS-FLUX 的观测数据对 NASA 的 MODIS 数据产品进行比较验证 (图 7), 可以看出, 无论在高寒的青藏高原还是温暖的华北平原, 由 MODIS 数据推算的地表面温度与实测值都比较一致, 这说明 MOD11 的地表面温度数据产品具有一定的可用性。相反, MOD15 的叶面积指数在 2 站点都与实测值相差甚远, 有必要对其计算方法和原理进行修正和改良。其次, 我们还正在对 MODIS 的其他数据产品在各个站点进行验证, 以便探索对 MODIS 数据处理的新方法。

3.3 陆地生态系统的水、热与碳循环过程的模拟

APIES-FLUX 的第 3 项任务是阐明主要陆地生态系统类型 (森林、草原、旱地、水田、荒漠) 的水热碳循环过程的生物物理机理与过程特征, 利用和开发陆地生态系统的动力学模型, 评价亚太地区陆地生态系统水热碳循环的时空格局及分布规律。本文利用 BIOME-BGC 模型对不同生态系统的水热碳循环过程极其自然调控和人为驱动机制进行了模拟。图 8 是利用该模型模拟的 2002 年禹城冬小麦生育期的水热碳通量极其灌溉的影响效果。其中, 图 8 (上) 给出的是禹城站观测到的气温 (Ta)、降水 (P)、灌溉 (Irr) 和饱和水汽压差 (VDP), 作为模型的输入变量; 模型中所使用的生物土壤参数均采用禹城站的观测值。图 8 (中) 是模拟的灌溉 (_Irr) 和非灌溉 (_no_Irr) 2 种情况下的蒸散量 (Trans) 和蒸发量 (Evap); 图 8 (下) 则给出了模拟的灌溉和非灌溉两种情况下的叶面积指数 (LAI) 和净第一性生产量 (NPP) 以及与 LAI 的观测值的对比。从中可以看出, 整个生长

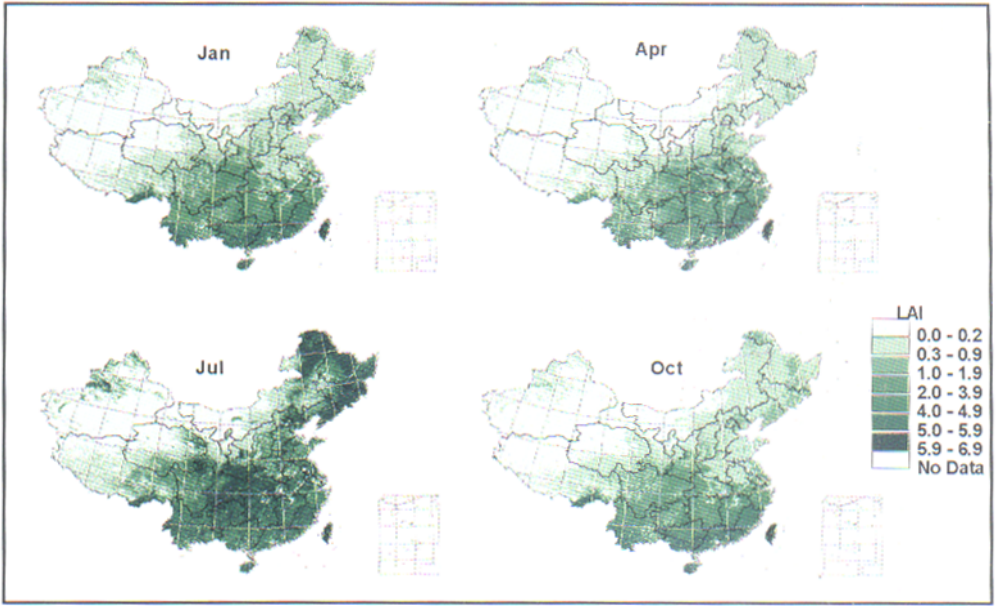


图 6 MODIS 数据产品: 2002 年叶面积指数 (LAI) 的季节变化
 Fig. 6 Example of MODIS data products: seasonal changes of leaf area index (LAI) in 2002

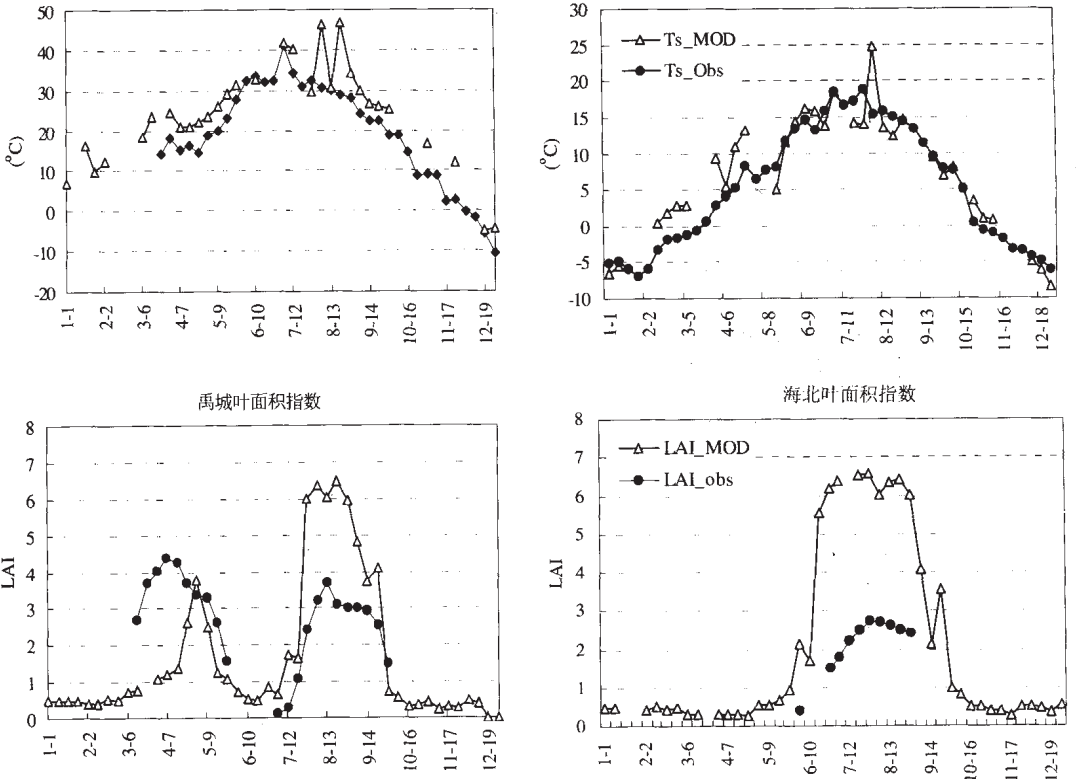


图 7 禹城和河北两站 8 天平均的地面观测值与 MODIS 数据产品的比较

Fig. 7 Comparison of 8-day MODIS data products with ground measurements

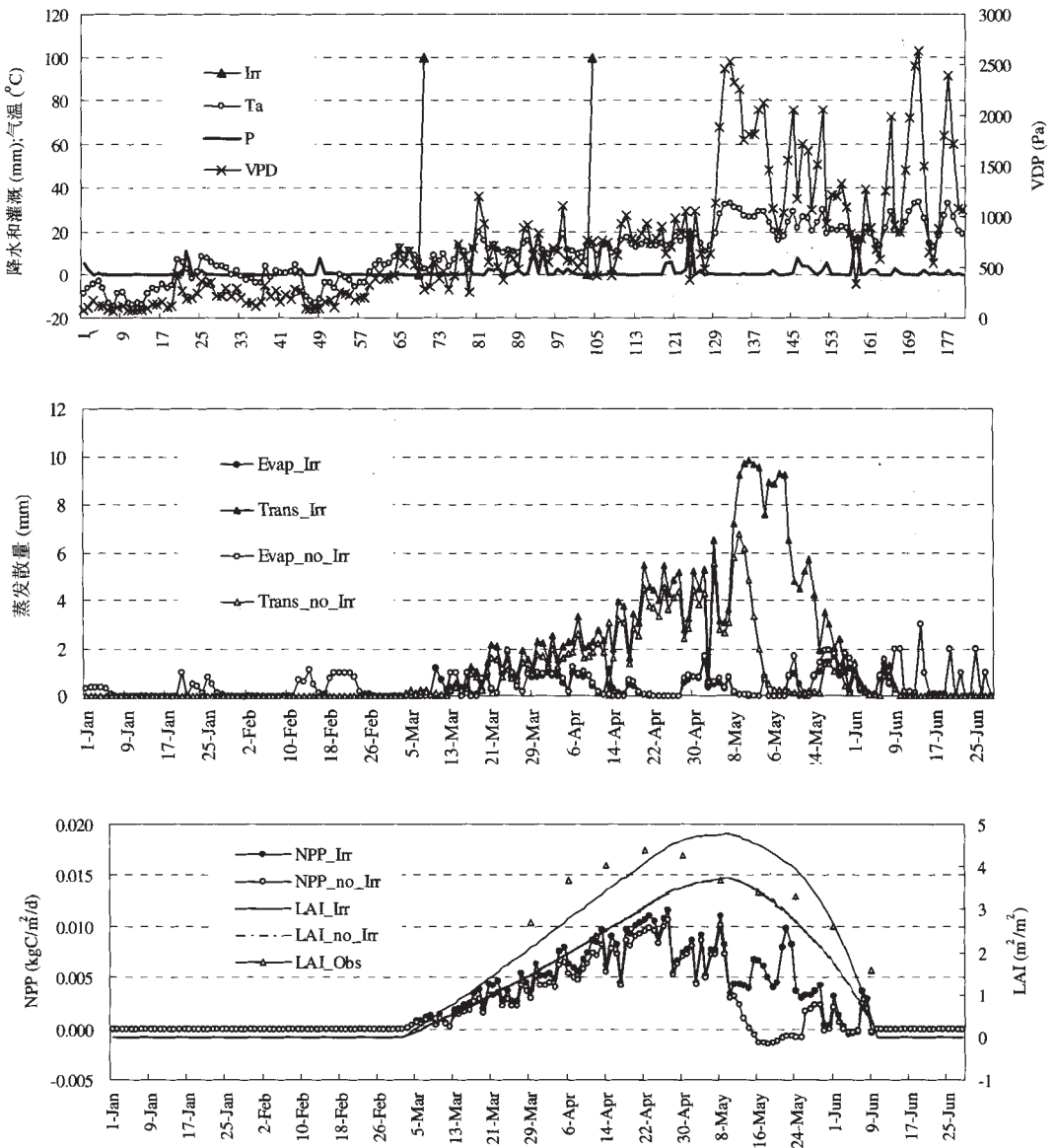


图 8 利用 BGC-Biome 模型模拟的 2002 年禹城冬小麦生育期的水热碳通量及其灌溉效果

Fig. 8 Simulated water, heat and CO_2 fluxes and the effect of irrigation by BGC-Biome Model during the growing period of winter-wheat in 2002 at Yucheng Ecological Experimental Station

期内 LAI 的模拟值与观测值很接近, 说明该模式在通过对其参数进行调整后, 可以很好的模拟作物的生长过程及其与环境的相互作用。模拟结果显示, 5 月份以前饱和水汽压差偏小, 作物的蒸散量持续增长, 生长良好; 5 月份以后, 尤其是 5 月 8~24 日之间出现严重旱情, 如果没有前面 2 次灌溉, 作物将无水用于蒸散, 生长也将停止。所幸这 2 次灌溉在一定程度上缓解了旱情, 挽救了冬小麦免于死亡, 但因灌溉时间较早, 旱情依然影响了小麦的正常生长。在图中表现为 LAI 和 NPP 的观测值在 5 月份以前略大于模拟值, 而 5 月份以后则小于模拟值。

4 结论

本研究建立一个初具规模的陆地生态系统水热碳通量和循环过程的综合观测网络系统 (APEIS-FLUX)。通过近 2 年的数据采集和分析表明, 该系统是一个稳定可靠的系统, 它可以提供高质量、高精度、长期而连续的通量及生态要素的观测数据。通过比较各不同生态类型区的数据, 可清楚地反映出了不同生态系统类型的水热碳通量的差异性。

利用 APEIS-FLUX 数据对 NASA 的 MODIS 数据产品进行比较验证后发现, 部分产品如 MOD11 等与观测数据较吻合, 但大部分数据产品如 MOD12, MOD15 和 MOD17 等都与观测数据相差深远, 这说明有必要根据当地的实测数据对其处理程序和模式进行修正。

利用 APEIS-FLUX 数据对 BIOME-BGC 模型的模拟效果的验证结果表明, 该模式在通过对其参数进行修正后, 可以很好的模拟作物的生长过程及其相应的水热碳的循环过程。做为今后的研究课题, 我们将修正后的模式用于 MODIS 数据的处理, 可期望得到符合亚太地区实际情况的大面积的高质量遥感数据集。

参考文献 (References)

- [1] Andre J C, J P Goutorbe, T Schmugge et al. HAPEX-MOBILHY: results from a large-scale field experiment. In: A Rango (ed.), Remote Sensing and Large-Scale Global Processes. Wallingford, UK, International Association of Hydrological Sciences, 1989. 13-20.
- [2] Pinty J P, Mascart P, Richard E et al. An investigation of mesoscale flows by vegetation inhomogeneities using an evaporation model calibrated against HAPEX-MOBILHY data. *J. Appl. Meteor.*, 1989, 28: 976-992.
- [3] Noilhan J, J C Andre, P Bougeault et al. Some aspects of the HAPEX-MOBILHY programme: the data base and the modeling strategy. *Surv. Geophys.*, 1991, 12: 31-61.
- [4] Holtslag A A M, M Ek. The simulation of surface fluxes and boundary-layer development over the pine forest in HAPEX-MOBILHY. *J. Appl. Meteorol.*, 1996, 35: 202-213.
- [5] Sellers P J, Hall F G, Asrar G et al. The first ISLSCP field experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1988, 69: 22-27.
- [6] Desjardins R L, Schuepp P H, MacPherson J I. Spatial and temporal variations of CO₂, sensible and latent heat fluxes over the FIFE site. In: Proceedings of Symposium on FIFE, Anaheim, CA, February 7-9, 1990, 46-50.
- [7] Sellers P J, F G Hall, G Asrar et al. An overview of the First International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) Field Experiment (FIFE). *J. Geophys. Res.*, 1992, 97: 18345-18371.
- [8] Smith E A, A Y Hsu, W L Crosson et al. Area-averaged surface fluxes and their time-space variability over the FIFE experimental domain. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97: 18599-18622.
- [9] Bolle H J, J-C Andre, J L Arrue et al. EFEDA: European field experiment in a desertification-threatened area. *Annales Geophysicae.*, 1993, 11: 173-189.
- [10] Goutorbe J-P, T Lebel, A Tinga et al. HAPEX-Sahel: a large scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics. *Ann. Geophys.*, 1994, 12: 53-64.
- [11] Cuenca R H, J Brouwer, A Chanzy et al. Soil measurements during HAPEX-Sahel intensive observation period. *J. Hydrol. (HAPEX-Sahel Special Issue)*, 1996.
- [12] Sellers P, F G Hall, H Margolis et al. The Boreal Ecosystem-Atmospheric Study (BOREAS): an overview and early results from the 1994 field year. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1994.
- [13] Sun J, L Mahrt. Relationship of surface heat flux to microscale temperature variations: application to BOREAS. *Bound.-Layer Meteor.*, 1995, 76: 291-301.
- [14] GEWEX Continental-Scale International Project (GCIP) website, 2002. <http://www.ogp.noaa.gov/mpe/gapp/gcip/>
- [15] Henderson-Sellers et al. The project for intercomparison of land surface parameterisation schemes (PILPS) Phases 2 and 3. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1995, 76: 489-503.
- [16] Henderson-Sellers et al. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS): 1992 to 1995. *Climate Dynamics*, 1996, 12: 849-859.
- [17] Pitman A J, Henderson-Sellers A. Recent progress and results from the project for the intercomparison of land surface parameterization schemes. *J. Hydrology*, 1998: 128-135.
- [18] FLUXNET website, 2001. <http://daacl.esd.ornl.gov/FLUXNET/>

- [19] Wilson K, A Goldstein, E Falge et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 223-243.
- [20] Masataka Watanabe, Jiyuan Liu, Shogo Murakami et al. Integrated Environmental Monitoring of the Asia-Pacific Region Asia-Pacific Environmental Innovation Strategy (APEIS): Building Scientific Infrastructure for Innovative Policies for Sustainable Development, IHDP Update, Newsletter of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, No.2, 2002.
- [21] NASA MODIS website, 2001. <http://modis.gsfc.nasa.gov/>
- [22] Running S W, J C Coughlan. A general model of forest ecosystem processes for regional applications, I: hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 1988, 42: 125-154.
- [23] Running S W, R E Hunt. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. In: J R Ehleringer, C B Field (eds.), *Scaling Physiologic Processes: Leaf to Globe*. San Diego, CA: Academic Press, 1993. 141-158.
- [24] Chen J M. A vital defect in current remote-sensing evaporation models and its improvement. *Chinese Science Bulletin*, 1988, (6). [陈镜明. 现用遥感蒸散模式中的一个重要缺点及改进. *科学通报*, 1988, (6).]
- [25] Wilson K B, Goldstein A H, Falge E et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric. For. Meteorol.*, 2002, 113: 223-243.

Monitoring and Simulation of Water, Heat and CO₂ Fluxes in Various Terrestrial Ecosystems

WANG Qinxue¹, WATANABE Masataka¹, HAYASHI Seiji¹, MURAKAMI Shogo¹,
OUYANG Zhu², LI Yan³, LI Yingnian⁴, WANG Kelin⁵

(1. *National Institute for Environmental Studies, Tsukuba 305-8506, Japan;*

2. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

3. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China;*

4. *Northwest Plateau Institute of Biology, CAS, Xining 810008, China;*

5. *Institute of Subtropical Agricultural Ecology, CAS, Changsha 410125, China)*

Abstract: Water vapor, heat and CO₂ fluxes as well as ecosystem characteristics have been measured at 5 sites in different ecological systems at Haibei (grassland), Yucheng (dryland), Taoyuan (paddy field), Qianyanzhou (forest land) and Fukang (saline desert) in China since the spring of 2002. These sites were set up initially for the validation of satellite data obtained from MODIS station established for the project "Asia-Pacific Environmental Innovation Strategy (APEIS)", which was launched in 2001 by the Ministry of the Environment of Japan, so we called them APEIS-FLUX system. The main objective of this study was to validate estimates of surface temperature, evaporation, soil moisture, as well as leaf area index and net primary productivity (NPP) generated by MODIS satellite data, and to understand the mechanisms controlling the exchanges of energy, water vapor and CO₂ across a spectrum of time and space scales. The results show that both latent flux and CO₂ flux are much higher in the crop field than those in the grassland and the saline desert, but the sensible heat flux is in the opposite way. Using the observed data to validate the MODIS data products, we found that different products have very different correspondence, which suggests that the algorithm to be used to process MODIS products needs to be revised by using the local dataset. We used the APEIS-FLUX data as the inputs and parameters of Biome-BGC model, and found that the revised model can simulate wheat growing process, heat and carbon fluxes over it well.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net/>

Key words: APEIS-FLUX; water vapor and CO₂ flux; MODIS; terrestrial ecosystem model