

# 生态系统通量研究进展\*

张旭东 彭镇华 漆良华 周金星\*\*

(中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

**【摘要】** 开展生态系统通量的长期定位观测研究具有重要的意义, 本文在总结生态系统通量概念与内涵的基础上, 概要介绍了全球通量网、区域通量网(美洲网、欧洲网、亚洲网)和中国陆地生态系统通量观测研究网络的建设和发展历程, 以及生态系统通量的主要研究方法, 包括微气象学方法(涡度相关法、质量平衡法、能量平衡法和空气动力学法)和箱式法(静态箱法和动态箱法)及其基本工作原理; 系统地对不同生态系统类型, 包括森林生态系统、农田生态系统、草原生态系统和水体生态系统的 CO<sub>2</sub> 通量、N<sub>2</sub>O 通量、CH<sub>4</sub> 通量、热通量等研究成果、方法及进展进行了评述; 最后, 结合我国不同生态系统类型通量研究的现实与需要, 从生态系统通量研究的策略、水平、方法以及资金的投入、数据的管理与使用等方面提出了一些合理化建议与展望。

**关键词** 生态系统 通量 微气象学方法 箱式法

**文章编号** 1001-9332(2005)10-1976-07 **中图分类号** X16 **文献标识码** A

**Research advances in ecosystem flux.** ZHANG Xudong, PENG Zhenhua, QI Lianghua, ZHOU Jinxing (*Institute of Forestry Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2005, 16(10):1976~1982.

To develop the long-term localized observation and investigation on ecosystem flux is of great importance. On the basis of generalizing the concepts and connotations of ecosystem flux, this paper introduced the construction and development histories of Global Flux Networks, Regional Flux Networks (Ameri-Flux, Euro-Flux and Asia-Flux) and China-Flux, as well as the main methodologies, including micrometeorological methods (such as eddy correlation method, mass balance method, energy balance method and air dynamic method) and chamber methods (static and dynamic chamber methods), and their basic operation principles. The research achievements, approaches and advances of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, and heat fluxes in forest ecosystem, farmland ecosystem, grassland ecosystem and water ecosystem were also summarized. In accordance with the realities and necessities of ecosystem flux research in China, some suggestions and prospects were put forward.

**Key words** Ecosystem, Flux, Micrometeorological method, Chamber method.

## 1 引言

随着人类发展和工业污染, 已出现了一系列生态环境问题, 诸如“温室效应”的加剧, 非点源污染, 生物多样性减少, 水资源短缺等。其中, 大气中 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 等温室气体浓度的逐年增加, “温室效应”已成为影响全球气候变化的一个重要因素<sup>[32]</sup>。通过开展不同生态系统通量的长期定位观测研究, 可为进行 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 等吸收与释放过程调控、能量流动与物质循环、以及改善人类生存环境提供必要的依据<sup>[36]</sup>, 而且可为全球及各个国家与地区可持续发展的科学决策提供重要的基础性数据。国内外关于通量研究的综合论述大多是关于森林生态系统的研究或者有关 CO<sub>2</sub> 通量的研究<sup>[45]</sup>, 而对于不同生态系统类型、各种物质通量、热通量等方面研究进展的综合性论述还未见报道。本文立足于通量的基本概念与内涵, 在全面回顾生态系统通量网发展与建设历程的基础上, 较系统地总结了生态系统通量的研究方法, 并对森林生态系统、农田生态系统、草原生态系统和水体生态系统等不同生态系统类型的 CO<sub>2</sub> 通量、N<sub>2</sub>O 通量、CH<sub>4</sub> 通量、热通量等的研究进展分别进行了评述。

## 2 生态系统通量的概念与内涵

通量是物理学用语, 指单位时间内通过一定面积输送的动量、热量和物质等物理量的速度; 通量密度则是单位时间内通过某一界面单位面积所输送的物理量, 常简称为通量。在陆地生态系统的土壤-植物-大气系统的物质和能量交换过程中, 许多物理量都是通过某种界面进行的, 如土壤-根系界面、细胞-细胞界面、细胞-组织界面、叶片-空气界面、土壤-大气界面、植被-大气界面等<sup>[35]</sup>。这种物质循环和能量交换过程的定量描述都是以通量密度为基础。在环境、气象和生态学领域, 通量研究主要是针对生态系统尺度的土壤-大气界面或植被-大气界面的地-气系统的物质流和能量流而展开, 所关注且可直接测量的物理量通量主要有生态系统的能量输入和输出通量(土壤-大气界面或植被-大气界面的辐射通量、显热通量和潜热通量), 动量传输通量和气体(大量或

\* 国家“十五”科技攻关项目(2002BA516A17)、国家自然科学基金项目(30070603)、中美合作资助项目(USCCC)和国家林业局林木培育重点实验室基金资助项目(2005-01)。

\*\* \* 通讯联系人。

2004-10-28 收稿, 2005-02-28 接受。

痕量温室气体)交换通量等<sup>[17]</sup>。

### 2.1 辐射通量

单位时间内物质放出的能量即为辐射通量,在一个平面上单位时间单位面积放出的能量称为辐射通量密度。在环境和生态学领域,辐射主要指太阳辐射和地球辐射。太阳辐射的能量主要分布于 0.3~0.4  $\mu\text{m}$ ,为短波辐射;地球辐射的能量主要分布于 4~100  $\mu\text{m}$ ,为长波辐射或红外辐射。陆地生态系统的辐射收支通常是指在垂直方向上的能量输入与输出平衡,辐射平衡用辐射能或辐射通量密度计算<sup>[17]</sup>。

### 2.2 显热和潜热通量

在不发生物体和媒介的状态变化(相变)条件下,通过热传导和对流(湍流)所运输的能量即为显热,当两个温度不同的物体接触时,会发生热量传输,传输的热量称为显热通量。显热通量与温度差值成正比,这个比例系数称为显热传输系数或显热交换系数。

当物质因发生相变而吸收或放出的热能称为潜热。通过大气等介质,水蒸汽传输能量时,单位时间通过单位面积的潜热流量称为潜热通量。潜热通量与断面两侧的水蒸汽的浓度差成正比,这个比例系数称为潜热传输系数。

### 2.3 动量通量

在大气边界层的下方,空气运动在粘附力的作用下,在地表和大气之间会形成一个速度梯度,产生切应力,由这种切应力传输动量的过程称为动量传输。单位时间通过单位断面所传输的动量称为动量通量。动量通量的计算可根据空气动力学的基本理论,依据地表-大气间的风速廓线特征曲线进行求解。

### 2.4 物质通量

在陆地生态系统的植被-大气或土壤-大气之间主要的扩散输送物质包括水蒸汽、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等气体。这些物质的通量密度是指单位时间通过单位土地面积的输送量<sup>[17]</sup>。如  $\text{CO}_2$  通量就是指通过某一个参考界面  $\text{CO}_2$  的传输速率,陆地生态系统的  $\text{CO}_2$  通量则是陆地生态系统(包括森林、草地、裸地、农作物、水等)与大气之间  $\text{CO}_2$  传输速率<sup>[45]</sup>。

### 2.5 $\text{H}_2\text{O}$ 通量

$\text{H}_2\text{O}$  通量是生态系统水循环过程的重要特征参数。植被下垫面的蒸发可分为地面或水面的蒸发、植被冠层截获降雨的蒸发和植物蒸腾三部分,三者之和即为蒸发散。蒸发强度或蒸发速度实际上就是水蒸汽通量,其时间上的积分值就是蒸发量<sup>[27]</sup>。

陆地-大气系统的  $\text{H}_2\text{O}$  通量与蒸发的类型相对应,可细分为地面或水面的蒸发通量、植被冠层截获降雨的蒸发通量和植物的蒸腾通量。但在实际生态系统中,这种划分很困难,通常利用微气象法测定  $\text{H}_2\text{O}$  通量是各种通量的总和,可以依据下垫面的植被覆盖状况和各种假设条件具体定义为蒸发通量、蒸腾通量和蒸发散通量<sup>[31]</sup>。

## 3 生态系统通量网的建设与发展

### 3.1 全球通量网

20 世纪 90 年代中期,欧洲、美洲的发达国家率先通过

建立  $\text{CO}_2$  通量观测塔对各种陆地生态系统进行长期定位观测,并相继建立网站,有效地扩大了各国科学家在生态系统通量研究领域的合作。

全球通量网于 1996 年发起,旨在有效联合全球通量研究者,共同研究全球范围内不同经纬度、不同生态系统类型通量的国际性研究组织。该项目受到美国能源部、美国国家航空和宇宙航行局资助,并负责组织协调项目的实施,归档来自区域网络的数据并建立数据共享网站<sup>[3,5,37,44]</sup>。目前已经建立的网站由美洲网、欧洲网、地中海网、亚洲网、澳洲与新西兰网、巴西亚马逊网和欧洲-西伯利亚网,以及一些独立观测站点在内的多个地域性网站构成。拥有 100 多个研究站点、近 40 个不同参数的网络共享数据库,其中,70% 的数据库包括降雨量资料,80% 的数据库包括有关植被类型资料,56% 的数据库拥有叶面积指数资料<sup>[3,4,16]</sup>。

### 3.2 区域性通量网

**3.2.1 美洲网** 建立于 1996 年,目前共有 42 个研究站点,建立有自己的网站。所有美洲网研究者所用的方法都是涡旋相关法, $\text{CO}_2$  浓度的测定使用开放通路或封闭通路远红外  $\text{CO}_2$  测定装置,但所使用的仪器和分析软件并不完全统一。为保证数据的可靠性,在不同研究组之间,轮流使用相同的参考仪器进行校检。美洲网所提供的数据保存在  $\text{CO}_2$  信息分析中心,共有原始数据和处理数据两类数据格式<sup>[2,3,5,37]</sup>。

**3.2.2 欧洲网** 建立于 1996 年,主要目的是研究欧洲森林  $\text{CO}_2$  汇的容量以及调节气候(空气湿度和温度)的作用。欧洲网全部集中在森林植被上,这种集约化研究使得准确评价欧洲森林在碳沉积方面的作用成为可能。欧洲网所有研究基金都来自欧盟的支持。目前网站已和地中海网等合并成为欧洲碳网站。欧洲网覆盖的范围较美洲网集中,气候类型主要包括地中海气候、温带气候和干旱性气候。欧洲网的数据也是由  $\text{CO}_2$  信息分析中心提供网络服务,有德国、比利时、荷兰、丹麦、芬兰、法国和英国的 9 个数据库可供使用<sup>[3,5,37,44]</sup>。

**3.2.3 亚洲网** 由日本网发展而来。由 1998 年仅有日本 5 个站点发展到现在,已经拥有大约 40 个网站。其中,日本国内 25 个,其他国家和地区 15 个,囊括了从赤道南部的 Pureua 到美国的阿拉斯加冻原带。亚洲网于 2000 年建立网站,目前正在协调有关数据共享的工作<sup>[52]</sup>。亚洲网目前真正处于亚洲大陆的通量研究地点仅 5 个<sup>[19]</sup>,其站点分布情况对于精确计算亚洲陆地生态系统通量还不够,应该加大对亚洲大陆不同经纬度、不同海拔和不同植被类型的通量研究力度。

### 3.3 中国陆地生态系统通量观测研究网络

中国已建立陆地生态系统通量观测研究网络,它是以中国生态系统研究网络为依托,以微气象学的涡度相关技术和箱式/气相色谱法为主要技术手段,进行典型生态系统与大气间  $\text{CO}_2$  和水热通量长期观测的研究网络。目前,拥有 6 个微气象和 16 个箱式/气相色谱法观测站,在进行长期通量观测的同时,开展生态系统碳循环和水循环过程的综合研究,并系统收集观测站区的植被、土壤、水文和气象等科学数据。

现有的微气象观测网络包括4个森林(长白山、千烟洲、鼎湖山、西双版纳)、1个草地(海北)和1个农田(禹城)生态系统类型,16个箱式/气相色谱法观测站涵盖了我国主要的农田、草地、森林、水体等生态系统类型,主要测定生态系统CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O的排放量。同时,还将计划增加内蒙古和拉萨两个草地生态系统微气象通量观测站,并与国外研究机构在中国建立的观测站进行合作,构成完整的观测研究体系<sup>[7]</sup>。

#### 4 生态系统通量的主要研究方法

生态系统通量的研究方法主要包括微气象学法和箱式法两种<sup>[23,42]</sup>。其中,微气象学方法主要有<sup>[18,44]</sup>涡度相关法、质量平衡法、能量平衡法、空气动力学法等;箱式法则分静态箱法<sup>[38]</sup>和动态箱法<sup>[50]</sup>两种。

##### 4.1 微气象学法

微气象学法通过测量近地层的湍流状况和被测气体的浓度而获得该气体的通量值。该方法的基本条件是微气象参数测量必须在常通量层中进行,要求大面积均匀地表状况,这样,在某一高度上测量得到的气体输送通量就可认为是测点附近地表该气体的交换通量<sup>[23]</sup>。

**4.1.1 涡度相关法** 首先应用于测量水汽通量,20世纪80年代拓展到CO<sub>2</sub>通量研究中。根据连续方程,空间某一高度处气体的瞬时通量值 $F_g$ 可记为:

$$F_g = w \cdot \rho_g$$

式中, $w$ 为垂直风速,将 $w$ 和 $\rho_g$ 写成平均量 $\bar{w}$ , $\bar{\rho}_g$ 和脉动量 $w'$ , $\rho_g'$ 之和的形式,上式可变为:

$$F_g = \bar{w} \cdot \bar{\rho}_g + w' \cdot \rho_g'$$

可见,在常通量层中某一高度上,测量垂直风速和被测气体密度的脉动值便可确定该气体在这一高度上的通量值。在野外实际测量中,由于垂直方向上的平均风速通常很小(一般低于 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ),很难直接测到,因此, $\bar{w}$ , $\bar{\rho}_g$ 通常是根据感热通量(H)和潜热通量(E)来计算得到。经过简单变换上式可写为:

$$F_g = w' \cdot \rho_g' + (\rho_g \cdot \rho_a) \cdot [\mu/\sigma + \mu\sigma(1 + \mu\sigma)] \cdot E + (\rho_g \cdot \rho_a) \cdot (H/c_p) \cdot T$$

式中, $\rho_g$ 和 $\rho_a$ 分别为被测气体密度和空气密度, $\mu$ 为干空气分子量(Ma)与水汽的分子量(Ma)之比, $\sigma$ 为水汽密度( $\rho_v$ )与空气密度( $\rho_a$ )之比, $c_p$ 为空气的定压比热, $T$ 是气温。 $H$ 、 $E$ 、 $\sigma$ 、 $T$ 以及垂直风速脉动量 $w'$ 和被测气体密度的脉动量( $\rho_g'$ )等均为可测量,根据观测结果可获得观测高度处的被测气体垂直输送通量。

**4.1.2 质量平衡法** 该法通过测量穿过某一垂直平面的水平通量来推算该气体的垂直输送通量<sup>[8,18]</sup>。假定被测气体从某一排放区域完全移过测点所在的垂直平面,则在上风方向一定范围内进入大气的该气体量可表示为:

$$F_g = \frac{1}{X} \int_0^X u \cdot (\rho_g - \rho_b) dZ$$

式中, $X$ 为上风方向均匀下垫面的水平尺度, $u$ 是水平风速, $\rho_b$ 为气流进入排放区前空气中被测气体的密度,即本底值。

同样, $u$ 、 $\rho_b$ 和 $\rho_g$ 均可分别写成平流项和湍流项之和,但考虑到实际情况下湍流项远小于平流项,因此被测气体的垂直通量可由下式得到:

$$F_g = \frac{1}{X} \int_0^X \bar{u} \cdot (\bar{\rho}_g - \bar{\rho}_b) dZ$$

这样,本方法要求测量排放区域下风方向一定垂直高度范围内的平均风速和被测气体的平均浓度的垂直分布。

**4.1.3 能量平衡法** 又称Bowen比率法,首先被用于测量水蒸气通量<sup>[6]</sup>。目前已用于测定CO<sub>2</sub>通量,在国内普遍用于对农田、草地系统水分通量的研究上。其原理基于一个表面的能量平衡公式

$$S_n = G + H + LE$$

式中, $G$ 是土壤显热通量; $H$ 是土壤与大气之间的显热通量; $LE$ 是土壤与大气之间的潜热通量,其中 $L$ 为液态水汽化潜热; $E$ 是某一表面的蒸散速率; $S_n$ 和 $G$ 是测定量。

Bowen比率( $\beta$ )可以用来估计 $H$ 和 $LE$ :

$$\beta = \frac{H}{LE}$$

Bowen比率可以通过实验的方法加以确定:

$$\beta = \frac{c_p \Delta T}{L \Delta q}$$

式中, $c_p$ 是空气定压比热; $\Delta T$ 是两个参考高度的温度差; $\Delta q$ 是指相同高度间隔的空气湿度差。结合 $\beta$ ,蒸散速率 $E$ 可用下式计算:

$$E = \frac{S_n - G}{(\beta + 1)L}$$

知道蒸散速率后,可以计算CO<sub>2</sub>通量 $F$ 如下:

$$\frac{F}{E} = \frac{\Delta C}{\Delta q}$$

式中, $\Delta C$ 是相距相同高度间隔CO<sub>2</sub>浓度差。

**4.1.4 空气动力学法** Monteith等<sup>[30]</sup>首先引入这一理论并加以应用。根据空气动力学理论,在近地层内的空气动力学粗糙面上,某一气体浓度( $c_g$ )的垂直梯度可表示为<sup>[52]</sup>:

$$\frac{\partial c_g}{\partial Z} = \frac{(F_g \cdot \Phi_g)}{[\rho_a \cdot U^* \cdot K \cdot (Z - d)]}$$

式中, $Z$ 是观测高度, $\Phi_g$ 为该气体交换稳定度函数, $U^*$ 为摩擦风速, $K$ 为卡曼常数, $d$ 为零平面位移。

高度 $Z$ 处,某一气体向上的输送通量可表示为:

$$F_g = \rho_g \cdot k_g \cdot (dc_g/dZ)$$

式中, $k_g$ 是被测气体的湍流扩散系数,常借助于动量输送系数来确定。在中性大气条件下,热量扩散系数( $k_h$ )、动量扩散系数( $k_m$ )和气体扩散系数( $k_g$ )可认为相等, $k_g$ 可以从风廓线方程获得:

$$U(Z) = (U^*/k) \cdot \ln[(Z - d)/Z_0]$$

$$k_g(Z) = k \cdot U^* \cdot (Z - d)$$

其中, $U(Z)$ 为高度 $Z$ 处的风速, $Z_0$ 为表面粗糙度长度, $U^*$ 为摩擦风速。这样,测量风速和被测气体浓度的垂直梯度便可计算出高度 $Z$ 处该气体的通量值。但在实际测量中,中性大气条件往往得不到满足,通常要求进行大气稳定度修正,即

$$F_g = \frac{1}{\Phi_g} \cdot (\rho_g \cdot k_g) \cdot (dc_g/dZ)$$

根据 Monin-Obukhov 相似理论,实际大气中的动量、热量和水汽交换稳定度函数均为稳定度参数  $\Phi$  的函数,且可通过理查逊数  $R_i$  来表示:

$$Z/L = R_i (R_i > 0)$$

$$Z/L = R_i / (1 - 5R_i) \quad (R_i \leq 0)$$

$$R_i = (g/\theta) \cdot (\partial\theta/\partial Z) \cdot (dU/dZ)^{-2}$$

式中,  $g$  为重力加速度,  $\theta$  为位温,  $R_i$  为正表示稳定大气,  $R_i$  为负表示不稳定大气. 气体交换稳定度函数  $\Phi_g$  通常使用由 Dyer 等<sup>[15]</sup> 修正的表达式:

$$\text{稳定大气: } \Phi_g = (1 - 5R_i)^{-1}$$

$$\text{不稳定大气: } \Phi_g = (1 - 16R_i)^{-0.5}$$

这样,在一般情况下,为获得某一种气体的通量值需要测量该气体的垂直梯度、温度梯度和风速梯度.

#### 4.2 箱式法

箱式法的工作原理是用具有一定大小的特制箱子罩在一定面积的土壤及其植物上方,并隔绝箱子内外气体的自由交换,测定箱内空气中被测温室气体随时间的变化,并据此计算得到该气体的交换通量<sup>[42]</sup>.

**4.2.1 静态箱法** 又称密闭箱法,工作原理是在保持位于被测地块上方的箱内空气与外界没有任何交换的情况下,通过一段较短时间内箱内被测气体的浓度变化来获得该气体的界面交换通量.根据定义,某一界面处,某种气体的交换通量  $F_g(\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$  记为

$$F_g = \frac{1}{A} \frac{\partial m}{\partial t}$$

式中,  $A$  为箱子的底面积,  $m$  为被测气体的质量,  $t$  为时间.

根据气体状态方程和气体体积分数定义,经过转换得到静态箱法测定界面被测气体通量的计算公式:

$$F_g = h_c \cdot (M_g p / RT) \cdot (\partial c / \partial t) \\ = h_c \cdot \rho_g \cdot (\partial c / \partial t)$$

转换式中,  $h_c$  为箱子的高度 (m),  $M_g$  为被测气体的摩尔质量 ( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),  $R$  为普适气体常数 ( $R = 8.3144 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $T$  为箱内的气温 (K),  $p$  为气压 (Pa),  $c$  为箱内气体的体积分数 ( $\times 10^{-9}$ ),  $t$  为扣箱后的时间 (s),  $\rho_g$  为被测气体密度 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

这样,温室气体通量的测量就转化为微量气体的测量以及对所测浓度值进行回归计算.所获得  $F_g$  值的基本条件是认为单位时间内箱内被测温室气体的质量增加是一个常数,即箱内被测气体浓度呈线性增长.具体操作时,一般是在扣箱后 0、10、20 和 30 min 抽取箱内气体样品并用气相色谱仪获得被测气体浓度值,或者将气相色谱仪直接与采样箱相连接,组成自动观测系统获得被测气体浓度值.

**4.2.2 动态箱法** 又称开放箱法,其工作原理是让一定流量的空气通过箱子,通过测量箱体入口处和出口处空气中被测气体的浓度来确定被罩表面该气体的交换通量.根据气体不可压缩原理和物质守恒定律,动态箱法中,  $F_g$  值可由下式确定:

$$F_g = Q \cdot \rho_g \cdot \frac{(c_1 - c_2)}{A}$$

式中,  $Q = Q_1 = Q_2$  为流经箱体气体流量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ), 1、2 分别表示箱体出口处和入口处,  $\rho_g$ 、 $c$ 、 $A$  同上.用动态箱法测量时,应将箱内外气压差控制到最小,即箱内不出现明显对流,否则很小的气压差就会使气体通过土壤流入或流出箱体而造成测量误差.

## 5 生态系统通量研究

### 5.1 森林生态系统通量研究

**5.1.1 林分通量** 国内外关于森林生态系统通量的研究比较深入,并主要集中在  $\text{CO}_2$  通量研究上.不同纬度森林生态系统的  $\text{CO}_2$  通量具有显著的差异<sup>[41]</sup>,如欧洲森林随着纬度的增高,森林的净系统交换量变小,甚至成为正值;森林的  $\text{CO}_2$  通量具有明显的季节变化, Malhi 等<sup>[29]</sup> 应用涡旋相关技术对热带森林、温带森林和北方森林的季节变化模式进行研究后发现,热带森林全年都表现出净碳汇,温带森林在冬季净系统交换量是正值,接近 3 月份达到最大值,此后,随着叶子的发育和光合作用活动的开始而迅速变为负值,到 5 月末冠层郁闭时达到最低峰,北方森林净系统交换量也显示出相似的季节性循环; Lindroth 等<sup>[25]</sup> 认为,不同林型的  $\text{CO}_2$  通量特征也有很大的差别;周玉荣等<sup>[58]</sup> 估算了我国主要森林生态系统的碳贮量与碳平衡通量,发现我国森林生态系统在与大气的气体交换中表现为碳汇,基本规律是从热带向寒带,碳汇功能下降,它取决于系统碳收支的各个通量之间的动态平衡;等等.

**5.1.2 林地土壤通量** 孙向阳等<sup>[39,40]</sup> 用碱吸收法对北京西山 3 种林地土壤中  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的研究表明,林地土壤  $\text{CO}_2$  排放量为  $286 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,其年变化趋势为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季,冬季甚至有吸收值出现,同时,不同季节不同土壤的  $\text{CO}_2$  排放通量也明显不同;  $\text{N}_2\text{O}$  的排放通量为  $3.16 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,年变化趋势与  $\text{CO}_2$  相同,其排放通量的大小主要决定于土壤温度、土壤湿度和测定前 5d 的降水量等因子.齐玉春等<sup>[33]</sup> 利用静态箱法对贡嘎山山地暗针叶林带森林土壤中的  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  排放的研究结果表明,林地土壤是大气  $\text{N}_2\text{O}$  的排放源,是大气  $\text{CH}_4$  的吸收源,  $\text{N}_2\text{O}$  的排放通量也有明显的季节变化;等等.

**5.1.3 其他** 大气及其下垫的森林间羧基硫 (COS) 的浓度呈现出随高度下降而降低的趋势, COS 向 120 年和 80 年的山毛榉和云杉林分的平均输送通量为  $89 \sim 197 \text{ ng COS} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[51]</sup>;使用湍流梯度测试资料,对植物冠层动量交换特征的研究结果表明,森林冠层内湍流尺度有变小的趋势,森林上层的耗散系数比下层大,由植被吸收引起动量及动量通量随冠层深度增加而减小,冠层下层的动量通量和耗散系数分别与上层呈显著正相关,森林冠层内耗散系数和动量通量随大气稳定度有明显变化<sup>[24]</sup>;此外,不同的研究方法,所获得的结果也存在较大的差异<sup>[22]</sup>;等等.

森林生态系统通量的研究对象主要是天然林和次生林,

目前,中国林业科学研究院彭镇华、张旭东等学者正开展有关人工林生态系统通量的研究,已在湖南岳阳和安徽怀宁的长江滩地杨树人工林生态系统中建立了两个通量观测塔,拟进行长期的 CO<sub>2</sub>、水和能量交换数据的收集、处理和分析,收集关键性信息,确定人工林生态系统 CO<sub>2</sub> 的收支量化指标,并对未来大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化的减缓和适应进行可靠预测,为确定不同森林生态系统,尤其是人工林生态系统的年 CO<sub>2</sub> 净交换量,确定环境因子变化对 CO<sub>2</sub> 通量的影响,提供对 CO<sub>2</sub> 通量进行过程控制的实用信息,为区域性模型的建立和检验提供可靠的 CO<sub>2</sub>、水分和能量通量交换参数。

## 5.2 农田生态系统通量研究

国内外关于农田生态系统通量的长期定位观测研究还尚未见报道,我国的微气象观测网络已建立了1个农田生态系统类型的观测站点(禹城),国内许多学者对农田生态系统 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 等排放通量的研究也比较深入。

**5.2.1 CO<sub>2</sub> 通量** 杨晓光等<sup>[53]</sup>利用 CO<sub>2</sub> 分析系统,CO<sub>2</sub> 浓度差配合波文比装置,测定了夏玉米农田群体 CO<sub>2</sub> 浓度差和农田气候特征,发现 CO<sub>2</sub> 通量、CO<sub>2</sub> 浓度差及群体水分利用率存在明显的日、季节变化规律,为指导实践提供了理论依据;由于农田生态系统冠层 CO<sub>2</sub> 通量不仅与光强的变化有关,还受温度、风速、土壤湿度等因子变化的影响,因此用不同方法模拟计算的日同化量有时存在较大的误差,因此,张永强等<sup>[57]</sup>对农田生态系统的 CO<sub>2</sub> 通量转换计算进行了研究;等等。

**5.2.2 N<sub>2</sub>O 通量** 曾江海等<sup>[55]</sup>定量分析了小麦-玉米农作期土壤排放 N<sub>2</sub>O 通量与总量,以及与土壤湿度、地温、气温、降水和施氮量的关系;于克伟等<sup>[54]</sup>在与裸地 N<sub>2</sub>O 通量比较的基础上,用封闭箱法原位观测了几种旱田 N<sub>2</sub>O 的排放通量,评价了植物在 N<sub>2</sub>O 的排放通量中的作用及环境因子对 N<sub>2</sub>O 通量的影响;有学者对农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量分布格局进行了研究,发现农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量存在明显的地区差异<sup>[46]</sup>;玉米、大豆田中 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 全年的通量变化有明显的季节变化和日变化,而作为大气 CH<sub>4</sub> 的源或汇的作用并不明显<sup>[21]</sup>。

**5.2.3 S 通量** 大气硫沉降是农田生态系统获取硫素的一个重要途径,张明等<sup>[56]</sup>利用阻力模式和全年逐时气象资料计算 SO<sub>2</sub> 和干沉降速度,估算干沉降通量,利用降水资料和雨水中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的浓度来估算大气硫的湿沉降,从而对大气硫沉降输入农田生态系统的通量定量化,农田下垫面干沉降占沉降的 83.3%,硫的干沉降又以 SO<sub>2</sub> 的干沉降为主,占年干沉降总量的 92.2%,大气硫沉降输入占农田生态系统输入总量的 90% 以上。

**5.2.4 热通量及其它** 刘树华等<sup>[26]</sup>、Anderson 等<sup>[1]</sup>利用空气动力学方法研究了农田近地面层特征,CO<sub>2</sub> 通量、感热通量、潜热通量和动量通量;孙卫国等<sup>[38]</sup>以莫宁-奥布霍夫相似理论为基础,利用风温梯度观测资料,采用迭代方法确定湍流特征参量和廓线参数,得出了适用于确定农田植被上方风温廓线和湍流通量的普适函数半经验表达式。

## 5.3 草原生态系统通量研究

**5.3.1 CO<sub>2</sub> 通量** 有关草原生态系统通量的长期定位观测研究的报道国内外较少,我国的微气象观测网络已建立了1个草原生态系统类型的观测站点(海北)。

对关于草原土壤-植被系统 CO<sub>2</sub> 排放与吸收的生物机理,以及静态箱法在草地 CO<sub>2</sub> 通量原位观测实验中所存在的问题,加以改进,通过连续跟踪观测,解决了利用静态箱法原位观测草原土壤-植被系统与大气间 CO<sub>2</sub> 交换通量偏离实际的难题,校正了观测值的偏差<sup>[13]</sup>。

**5.3.2 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 通量** 密封箱式法对羊草草原和大针茅草原生态系统与大气间 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 交换通量的季节变化和日变化原位观测结果表明<sup>[9,10]</sup>,羊草草原和大针茅草原生态系统 N<sub>2</sub>O 交换通量范围分别为 0.72~9.69 和 -0.54~6.37 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,平均通量分别为 6.99 和 3.06 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,CH<sub>4</sub> 交换通量范围分别为 -54.58~8.21 和 -95.51~-32.47 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,平均通量分别为 -27.16 和 -50.97 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>;还有学者<sup>[11,12,14,43]</sup>对草原土壤 N<sub>2</sub>O 产生的机理、土壤水分和温度对草原 N<sub>2</sub>O 排放的影响与 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放通量的季节变化特征进行了研究;王艳芬等<sup>[47,48]</sup>对锡林河流域草原 CH<sub>4</sub> 通量的研究表明,天然草原是 N<sub>2</sub>O 的源、CH<sub>4</sub> 的汇,其排放和吸收具有明显的昼夜变化规律和季节变化规律,其通量变幅较大,并分析揭示了甲烷通量与降水和温度,尤其是与地温之间的关系,不同放牧处理在一定的间尺度上对土壤-植被系统吸收甲烷没有显著影响。

## 5.4 水体生态系统通量研究

**5.4.1 碳通量** 水体生态系统中,关于海洋生态系统通量的研究报道多于河流生态系统。如对南沙海域上层海水碳垂直通量的研究表明<sup>[20]</sup>,上层海水颗粒有机碳总生成量为 298 mg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>,其中 35% 分解参与再循环,65% 以颗粒形式离开真光层向下输送,颗粒有机碳向下通量为 193 mg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>,总溶解无机碳穿过跃层向上垂直通量为 3 600 mg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>,真光层颗粒无机碳向下通量为 27 mg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>,大气进入海洋的海气界面 CO<sub>2</sub> 通量为 13 mg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>。

**5.4.2 N<sub>2</sub>O 通量** 对太湖地区湖水与河水中溶解 N<sub>2</sub>O 及其排放的研究结果表明<sup>[49]</sup>,太湖 N<sub>2</sub>O-N 的平均排放通量为 3.53 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,大运河已高达 122.5 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,湖水中溶解 N<sub>2</sub>O-N 浓度为 0.36 μg·L<sup>-1</sup>,大运河河水中浓度高达 11.31 μg·L<sup>-1</sup>,不同深度水中 N<sub>2</sub>O 浓度差异不明显,而时间差异显著,水面 N<sub>2</sub>O 的排放通量和水中溶解的 N<sub>2</sub>O 浓度呈显著正相关。

**5.4.3 热通量研究** 马耀明等<sup>[28]</sup>采用涡旋相关法对南沙海域的分析表明,大气向海洋输送的动量通量与水平风速的平方成正比,白天和晚上该海区都是将其贮存的热量以潜热或感热的形式输送到大气中,其中潜热输送占主导地位;感热和潜热输送的日变化不如陆地明显,感热输送的日均值远比陆地小,而潜热输送的日均值与绿洲相近,却比戈壁沙漠大得多;西太平洋海域在西风爆发过程中与其它天气过程相比<sup>[34]</sup>,无论是大气向海洋输送的动量通量,还是海洋向大气

输送的感热通量与潜热通量的值都最大。

## 6 我国生态系统能量研究展望

迄今为止,生态系统通量的研究已引起科学界的高度重视,而未来在广度和深度上将会有更大的发展。我国开展生态系统通量的研究应侧重以下几个方面:在研究策略上,采取典型地区的强化研究同大范围一般观测相结合的方式,并在研究各种因素(包括生物因素与非生物因素)对通量影响的基础上,建立不同通量估算模型,以实现由点到面的外推预测。在研究水平上,要从对陆地或海洋生态系统不同组分的分离性外拓到生态系统的水平。在研究方法上,应多利用涡旋相关法直接对陆地生态系统,尤其是森林生态系统进行CO<sub>2</sub>通量的长期研究,因为箱式法和生物量法研究往往是从森林生物量的增长和模型来推算森林的固碳通量,而忽略了森林土壤的碳源作用,以及森林生态系统内其他非目的植物种类和枯枝落叶的碳吸收/释放能力,并且没有对直接测定的林分-大气CO<sub>2</sub>通量进行校正。在资金的投入上,中国生态系统通量研究网络必须重视政府基础研究基金的投入,提倡多方联合,如美洲网的建设得到美国能源部、农业部与航空和宇宙航行局等多个单位的联合投资。在数据管理与使用上,要控制数据的质量,强化数据共享意识,在遵守数据共享利用原则的基础上,加强与国外各种通量网的联系,有效利用全世界范围内的共享数据,开展合作研究。

## 参考文献

- Anderson DE, Verma SB, Rosenberg NJ. 1984. Eddy correlation measurements of CO<sub>2</sub>, latent heat, and sensible heat fluxes over a crop surface. *Boundary-Layer Meteorol*, **29**:263~272
- Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. 1999. Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: The EUROFLUX methodology. *Adv Ecol Res*, **30**:113~176
- Baldocchi D, Falge E. 1998. A report from the Polson FLUXNET Workshop. FLUXNET Workshop, Polson Montana
- Baldocchi D, Olson R. 1999. FLUXNET: A challenge that is becoming reality. *IGBP Global Change Newsletter*, **37**:15~17
- Baldocchi D, Valentini R. 1996. The IGBP-BAHC global flux network initiative (FLUXNET): Current status and perspectives. *IGBP Global Change Newsletter*, **28**:14~16
- Bowen IS. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Phys Rev*, **27**:779~787
- CEYSN(中国生态系统研究网络), CFLUXO(中国通量观测网络项目办公室). 2004. The Brief Introduction of China Terrestrial Ecosystem FLUX Observe & Study Network. 1~2
- Denmead OT. 1983. Micrometeorological methods for measuring gaseous losses of nitrogen in the field. In: Freney JR, Simpson FR, eds. Gaseous Loss of Nitrogen from Plant-Soil Systems. The Hague: Martinus Nijhoff/Dr W. Junk. 133~157
- Du R(杜睿), Chen G-X(陈冠雄). 1997. The effect of different stocking rate on greenhouse gases of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes from grazing grassland ecosystem. *J Henan Univ(Nat Sci)*(河南大学学报·自然科学版), **27**(2):79~85 (in Chinese)
- Du R(杜睿), Chen G-X(陈冠雄), Lü D-R(吕达仁), et al. 1997. The primary research *in situ* measurements of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes from the Inner Mongolia grassland ecosystem. *Climate Environ Res(气候与环境研究)*, **2**(3):264~272 (in Chinese)
- Du R(杜睿), Lü D-R(吕达仁), Wang G-C(王庚辰), et al. 2003. The effect of temperature on grassland soil N<sub>2</sub>O releasing in typical Inner Mongolia. *Nat Sci Adv(自然科学进展)*, **13**(1):64~68(in Chinese)
- Du R(杜睿), Wang G-C(王庚辰), Lü D-R(吕达仁). 1998. Study on the mechanism of N<sub>2</sub>O production in typical grassland soils of Inner Mongolia. *China Environ Sci(中国环境科学)*, **6**(4):306~311(in Chinese)
- Du R(杜睿), Wang G-C(王庚辰), Lü D-R(吕达仁), et al. 2002. *In situ* measurements of CO<sub>2</sub> flux in grassland ecosystem by closed chamber technique. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, **22**(12):2167~2174(in Chinese)
- Du R(杜睿), Zhou Y-G(周宇光), Wang G-C(王庚辰), et al. 2003. The effect of soil water on grassland N<sub>2</sub>O releasing process in typical temperate zones. *Nat Sci Adv(自然科学进展)*, **13**(9):939~945(in Chinese)
- Dyer AJ. 1974. A review of flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorol*, **7**:363~372
- Falge E, Olson RJ, Tenhunen J. 2000. A perspective on the extension of FLUXNET by Asiaflux. In: CGER eds. Proceedings of International Workshop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation. Hokkaido, Japan.
- Finnigan JJ, Leuning R. 2000. Long-term flux measurements-co-ordinate system and averaging. In: CGER eds. Proceedings of International Workshop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation. Sapporo, Japan: Hokkaido University. 51~56
- Fowler D, Duyzer JH. 1989. Micrometeorological techniques for the measurement of trace gas exchange. In: Andreae MO, Schimel DS, eds. Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere. Chichester: John Wiley & Sons. 189~207
- Fujinuma Y, Takada M, Tashiro K, et al. 2001. International Workshop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation Proceedings. Tsukuba: National Institute for Environmental Studies
- Han W-Y(韩舞鹰), Wang M-B(王明彪), Wang H-K(王汉奎), et al. 1994. The vertical carbon flux of epipelagic water in the Nansha area of the South China Sea. *Oceanol Limnol Sin(海洋与湖沼)*, **25**(3):345~348(in Chinese)
- Huang G-H(黄国宏), Chen G-X(陈冠雄), Wu J(吴杰), et al. 1995. N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes from typical upland fields in Northeast China. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, **6**(4):383~386(in Chinese)
- Law BE, Ryan MG, Anthoni PM. 2000. Measuring and modeling seasonal variation of carbon dioxide and water vapor exchange of a *Pinus ponderosa* forest subjected to soil water deficit. *Global Change Biol*, **6**:613~630
- Lee X. 1998. On micrometeorological observation of surface-air exchange over tall vegetation. *Agric For Meteorol*, **91**:39~49
- Lei X-E(雷孝恩), Tian R-M(田瑞明), Han Z-W(韩志伟), et al. 1995. An experimental study on exchange characteristics of momentum in the plant canopy layer. *Sci Atmos Sin(大气科学)*, **19**(6):747~754(in Chinese)
- Lindroth A, Grelle A, Moren AS. 1998. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity. *Global Change Biol*, **4**:443~450
- Liu S-H(刘树华), Ma Y-M(麻益民). 1997. The characteristics of CO<sub>2</sub> concentration and flux, turbulence fluxes in the near surface layer over the wheat field. *Acta Meteorol Sin(气象学报)*, **55**(2):187~199(in Chinese)
- Lloyd J, Taylor JA. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Fun Ecol*, **8**:315~323
- Ma Y-M(马耀明), Wang J-M(王介民), Zhang Q-R(张庆荣), et al. 1997. The analysis of turbulent fluxes transfer characteristic over Nansha Sea Region. *Pla Meteorol(高原气象)*, **16**(1):45~51(in Chinese)
- Malhi Y, Baldocchi DD, Jarvis PG. 1999. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant Cell Environ*, **22**:715~740
- Monteith JL, Szeicz G. 1960. The carbon dioxide flux over a field of sugar beet. *Q J Roy Meteorol Soc*, **86**:205~214
- Ninomiya I, Hozumi K. 1981. Respiration of forest trees 1. Measurement of respiration of *Pinus densituhbergii* UYEKI by an enclosed standing tree method. *J Jpn For Soc*, **63**:8~18

- 32 Pacala SW, Hurtt GC, Baker D, *et al.* 2001. Consistent land-and-atmosphere-based U. S. carbon sink estimates. *Science*, **292**: 2316 ~ 2320
- 33 Qi Y-C(齐玉春), Luo J(罗辑), Dong Y-S(董云社). 2002. The emission of greenhouse gases ( $N_2O$  and  $CH_4$ ) from forest soils in Gongga mountainous dark coniferous forest. *Chin Sci (Series D) (中国科学·D辑)*, **32**(11): 934 ~ 941 (in Chinese)
- 34 Qu S-H(曲绍厚), Wang S(王赛). 1996. Some characteristics of the transfer of the turbulent fluxes during the westerly wind burst over the Western Pacific Tropical Ocean. *Sci Atmos Sin (大气科学)*, **20**(2): 188 ~ 194 (in Chinese)
- 35 Raupach MR. 1988. Canopy transport processes. In: Steffen WL, eds. *Flow and Transport in the Natural Environment: Advances and Applications*. Berlin: Springer-Verlag. 95 ~ 97
- 36 Schulze ED, Uoyd J, Kelliher FM, *et al.* 1999. Productivity of forests in the Euro Siberia boreal region and their potential to act as a carbon sink—A synthesis. *Global Change Biol*, **5**(6): 703 ~ 722
- 37 Starr D, Olson RJ, Baldocchi D, *et al.* 1999. FLUXDIS: A global flux data and information system to support EOS product validation. Progress Report to NASA. NASA Goddard Space Flight Center.
- 38 Sun W-G(孙卫国), Liu S-H(刘树华). 1995. Study on flux profile relations above farmland vegetation. *J Nanjing Ins Meteorol (南京气象学院学报)*, **18**(3): 404 ~ 409 (in Chinese)
- 39 Sun X-Y(孙向阳), Qiao J(乔杰), Tan X(谭笑). 2001. Flux of carbon dioxide ( $CO_2$ ) in temperate forest soils. *Chin J Northeast Silv Univ (东北林业大学学报)*, **29**(1): 34 ~ 39 (in Chinese)
- 40 Sun X-Y(孙向阳), Xu H-C(徐化成). 2001. Emission flux of nitrous oxide from forest soils in Beijing. *Sci Silv Sin (林业科学)*, **37**(5): 57 ~ 63 (in Chinese)
- 41 Valentini R, Matteucci G, Dolman AJ, *et al.* 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, **404**: 861 ~ 865
- 42 Wang G-C(王庚辰). 1997. A view on measurement methods for greenhouse gases emission from terrestrial ecosystem. *Climate Environ Res (气候与环境研究)*, **2**(3): 251 ~ 263 (in Chinese)
- 43 Wang G-C(王庚辰), Du R(杜睿), Wang Y-F(王艳芬), *et al.* 1998. Characteristics of  $N_2O$  and  $CH_4$  fluxes and their seasonal variations from Inner Mongolia grassland. *Acta Agrestia Sin (草地学报)*, **6**(4): 306 ~ 311 (in Chinese)
- 44 Wang W-J(王文杰), Shi F-C(石福臣), Zu Y-G(祖元刚), *et al.* 2002. Construction and development of  $CO_2$  flux networks on terrestrial ecosystem. *Chin J Northeast For Univ (东北林业大学学报)*, **30**(4): 57 ~ 61 (in Chinese)
- 45 Wang W-J(王文杰), Yu J-H(于景华), Mao Z-J(毛子军), *et al.* 2003. Study and research advance in forest  $CO_2$  flux. *Chin J Ecol (生态学杂志)*, **22**(5): 102 ~ 107 (in Chinese)
- 46 Wang X-K(王效科), Zhuang Y-H(庄亚辉), Li C-S(李长生). 2001. The distribution pattern of  $N_2O$  emission from agricultural soil in China. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, **21**(8): 1225 ~ 1231 (in Chinese)
- 47 Wang Y-F(王艳芬), Ji B-M(纪宝明), Chen Z-Z(陈佐忠), *et al.* 2000. Preliminary results of a study on  $CH_4$  flux in Xilin river basin steppe under different grazing intensities. *Acta Phytocol Sin (植物生态学报)*, **24**(6): 693 ~ 696 (in Chinese)
- 48 Wang Y-F(王艳芬), Ma X-Z(马秀枝), Ji B-M(纪宝明), *et al.* 2003. Diurnal and seasonal variation in methane and nitrous oxide fluxes in meadow steppe of Inner Mongolia. *Acta Phytocol Sin (植物生态学报)*, **27**(6): 792 ~ 796 (in Chinese)
- 49 Xiong Z-Q(熊正琴), Xing G-X(邢光熹), Shen G-Y(沈光裕), *et al.* 2002. Dissolved  $N_2O$  concentrations and  $N_2O$  emissions from aquatic systems of lake and river in Taihu Lake region. *Environ Sci (环境科学)*, **23**(6): 26 ~ 30 (in Chinese)
- 50 Xu M, BeBoase TA, Qi YA. 2000. Simple technique to measure stem respiration using a horizontally oriented soil chamber. *Can J For Res*, **30**: 1555 ~ 1560
- 51 Xu X-B(徐晓斌), Bingemer HG, Georgii HW, *et al.* 1996. On the exchange of carbonyl sulfide (COS) between the atmosphere and a forest ecosystem in Central Europe. *Acta Meteorol Sin (气象学报)*, **54**(3): 357 ~ 364 (in Chinese)
- 52 Yamamoto S, Murayama S, Saigusa N, *et al.* 1999. Seasonal and inter-annual variation of  $CO_2$  flux between a temperate forest and the atmosphere in Japan. *Tellus*, **51B**: 401 ~ 413
- 53 Yang X-G(杨晓光), Yu H-N(于沪宁). 1998. A study on  $CO_2$  flux density and water use efficiency of crop community in a field ecosystem. *Chin J Progr Geogr (地理科学进展)*, **17**(4): 16 ~ 24 (in Chinese)
- 54 Yu K-W(于克伟), Chen G-X(陈冠雄), Yang S-H(杨思河), *et al.* 1995. Role of several upland crops in  $N_2O$  emission from farmland and its response to environmental factors. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **6**(4): 387 ~ 391 (in Chinese)
- 55 Zeng J-H(曾江海), Wang Z-P(王智平), Zhang Y-M(张玉铭), *et al.* 1995. Approximate calculation on the emission flux and sum of soil  $N_2O$  in a wheat and maize rotation system. *Chin J Environ Sci (环境科学)*, **16**(1): 32 ~ 36 (in Chinese)
- 56 Zhang M(张明), Wang T-J(王体健), Zhang Y(张艳), *et al.* 2003. Observational study on atmospheric sulfur deposition to farmland ecosystem. *Sci Meteorol Sin (气象科学)*, **23**(3): 263 ~ 272 (in Chinese)
- 57 Zhang Y-Q(张永强), Liu C-M(刘昌明), Shen Y-J(沈彦俊), *et al.* 2001. Transitional calculation on carbon dioxide flux over agroecosystem. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **12**(5): 726 ~ 730 (in Chinese)
- 58 Zhou Y-R(周玉荣), Yu Z-L(于振良), Zhao S-D(赵士洞). 2000. Carbon storage and carbon budget of major Chinese forest types. *Acta Phytocol Sin (植物生态学报)*, **24**(5): 518 ~ 522 (in Chinese)

作者简介 张旭东,男,1962年生,博士,研究员.主要从事生理生态学、生态系统管理及林业生态工程等方面的研究,发表论文40余篇. Tel: 010-62889625; E-mail: zhxd@forestry.ac.cn