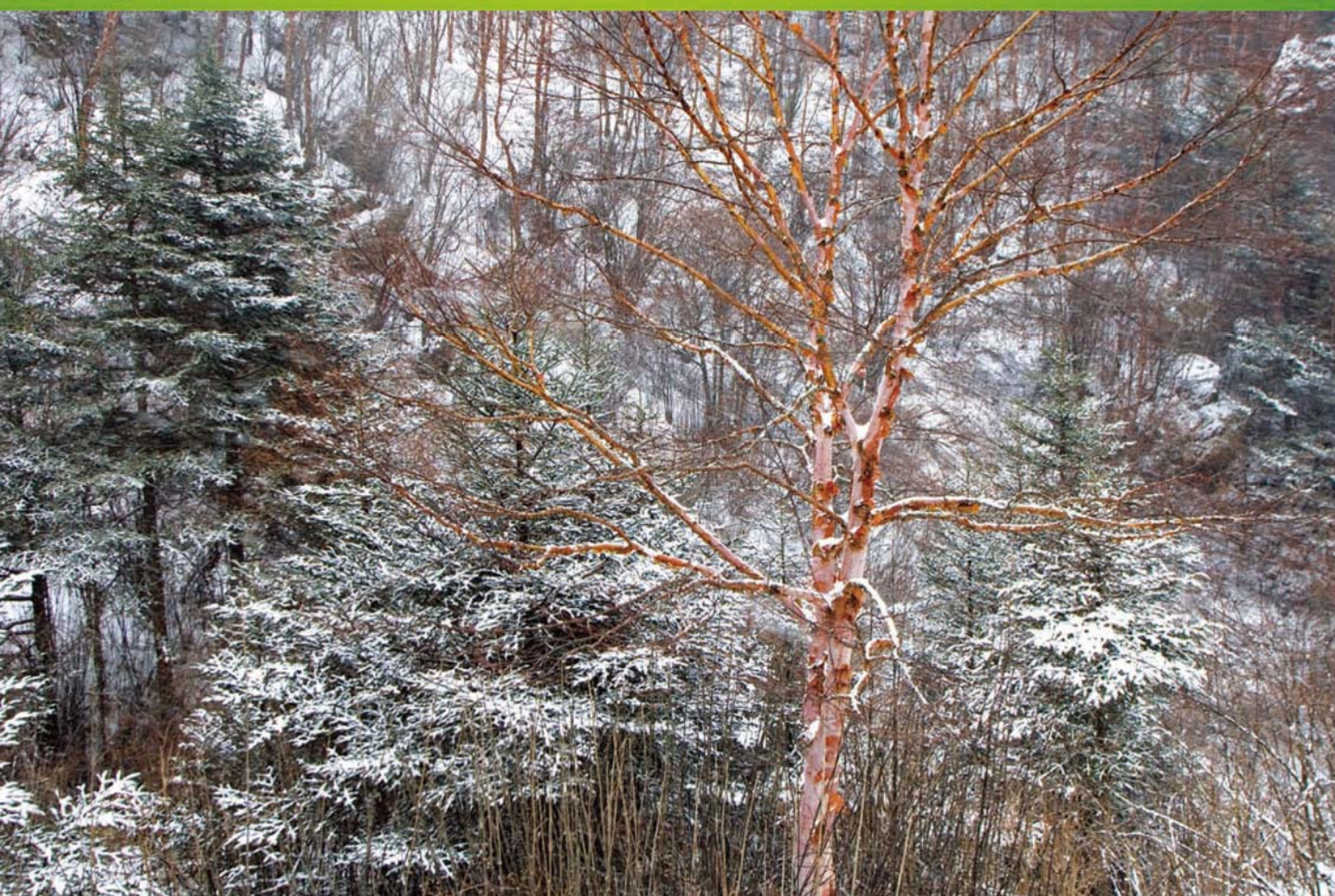


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

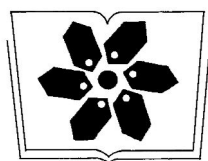
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第8期 Vol.34 No.8 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 8 期 2014 年 4 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 海洋浮游纤毛虫生长率研究进展..... 张武昌,李海波,丰美萍,等 (1897)
- 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展..... 王晓磊,王 成 (1910)
- 雪地生活跳虫研究进展..... 张 兵,倪 珍,常 亮,等 (1922)

个体与基础生态

- 黄河三角洲贝壳堤岛叶底珠叶片光合作用对 CO_2 浓度及土壤水分的响应.....
..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (1937)
- 米槠人促更新林与杉木人工林叶片及凋落物溶解性有机物的数量和光谱学特征.....
..... 康根丽,杨玉盛,司友涛,等 (1946)
- 利用不同方法测定红松人工林叶面积指数的季节动态..... 王宝琦,刘志理,戚玉娇,等 (1956)
- 环境变化对兴安落叶松氮磷化学计量特征的影响 平 川,王传宽,全先奎 (1965)
- 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征 程立平,刘文兆,李 志 (1975)
- 土壤水分胁迫对拉瑞尔小枝水分参数的影响..... 张香凝,孙向阳,王保平,等 (1984)
- 遮荫处理对臭柏幼苗光合特性的影响..... 赵 顺,黄秋娴,李玉灵,等 (1994)
- 漓江水陆交错带典型立地根系分布与土壤性质的关系..... 李青山,王冬梅,信忠保,等 (2003)
- 梭梭幼苗的存活与地上地下生长的关系..... 田 媛,塔西甫拉提·特依拜,李 彦,等 (2012)
- 模拟酸雨对西洋杜鹃生理生态特性的影响..... 陶巧静,付 涛,项锡娜,等 (2020)
- 岩溶洞穴微生物沉积碳酸钙——以贵州石将军洞为例..... 蒋建建,刘子琦,贺秋芳,等 (2028)
- 桂东北稻区第七代褐飞虱迁飞规律及虫源分析..... 齐会会,张云慧,蒋春先,等 (2039)

种群、群落和生态系统

- 鄱阳湖区灰鹤越冬种群数量与分布动态及其影响因素..... 单继红,马建章,李言阔,等 (2050)
- 雪被斑块对川西亚高山两个森林群落冬季土壤氮转化的影响..... 殷 睿,徐振锋,吴福忠,等 (2061)
- 小秦岭森林群落数量分类、排序及多样性垂直格局 陈 云,王海亮,韩军旺,等 (2068)
- 2012 年夏季挪威海和格陵兰海浮游植物群落结构的色素表征 王肖颖,张 芳,李娟英,等 (2076)
- 云南花椒园中昆虫群落特征的海拔间差异分析..... 高 鑫,张立敏,张晓明,等 (2085)
- 人工湿地处理造纸废水后细菌群落结构变化..... 郭建国,赵龙浩,徐 丹,等 (2095)
- 极端干旱区尾间湖生态需水估算——以东居延海为例 张 华,张 兰,赵传燕 (2102)

景观、区域和全球生态

- 秦岭重点保护植物丰富度空间格局与热点地区…………… 张殷波,郭柳琳,王 伟,等 (2109)
- 太阳辐射对黄河小浪底人工混交林净生态系统碳交换的影响…………… 刘 佳,同小娟,张劲松,等 (2118)
- 黄土丘陵区油松人工林生态系统碳密度及其分配 …………… 杨玉姣,陈云明,曹 扬 (2128)
- 湘潭锰矿废弃地不同林龄栎树人工林碳储量变化趋势…………… 田大伦,李雄华,罗赵慧,等 (2137)

资源与产业生态

- 湘南某矿区蔬菜中 Pb、Cd 污染状况及健康风险评估 …………… 吴燕明,吕高明,周 航,等 (2146)

城乡与社会生态

- 北京市主要建筑保温材料生命周期与环境经济效益评价 …………… 朱连滨,孔祥荣,吴 宪 (2155)
- 城市地表硬化对银杏生境及生理生态特征的影响…………… 宋英石,李 锋,王效科,等 (2164)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 276 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 29 * 2014-04



封面图说: 冷杉红桦混交林雪——冷杉是松科的一属,中国是冷杉属植物最多的国家,约 22 种 3 个变种。冷杉常常在高纬度地区至低纬度的亚高山至高山地带的阴坡、半阴坡及谷地形成纯林,或与性喜冷湿的云杉、落叶松、铁杉和某些松树及阔叶树组成针叶混交林或针阔混交林。冷杉具有较强的耐阴性,适应温凉和寒冷的气候,土壤以山地棕壤、暗棕壤为主。川西、滇北山区的冷杉林往往呈混交状态,冷杉红桦混交林为其中重要的类型。雪被对冷杉林型冬季土壤氮转化影响的研究对揭示高山森林对气候变化的响应及其适应机制提供重要的理论支持。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201308182105

刘佳, 同小娟, 张劲松, 孟平, 李俊, 郑宁. 太阳辐射对黄河小浪底人工混交林净生态系统碳交换的影响. 生态学报, 2014, 34(8): 2118-2127.

Liu J, Tong X J, Zhang J S, Meng P, Li J, Zheng N. Impacts of solar radiation on net ecosystem carbon exchange in a mixed plantation in the Xiaolangdi Area. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 2118-2127.

太阳辐射对黄河小浪底人工混交林净 生态系统碳交换的影响

刘 佳¹, 同小娟^{1,*}, 张劲松², 孟 平², 李 俊³, 郑 宁²

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 中国林业科学研究院林业研究所 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 太阳辐射是影响森林生态系统与大气间净碳交换(NEE)的主要环境因子之一。利用涡度相关系统和微气象梯度观测系统对黄河小浪底人工混交林 CO₂ 通量和相关气象因子进行了 3a(2006—2008 年)的连续观测;以晴空指数(k_t)为指标,分析了 2006—2008 年生长旺季(6—8 月)太阳辐射对该生态系统 NEE 的影响,讨论了太阳辐射和其他环境因子协同变化对 NEE 的影响机制。结果表明:2006—2008 年生长季,在多云天气下,生态系统最大光合速率 $P_{\max}$ 比晴朗天气下分别提高了 38%、58% 和 55%;多云天气下的初始光能利用率 α 分别是晴天天气的 2.6、1.9 和 2.2 倍。晴空指数 k_t 约为 0.44 的中等辐射条件下,即天空存在一定的云量时,人工混交林生态系统的净碳吸收最大。多云天气下,散射辐射的增加与气象因素变化(气温下降、饱和差减小)的相互作用会增加冠层光合、削弱呼吸作用,从而共同影响了净生态碳吸收的增强。因此,在植被生长旺季,与晴朗无云天气相比,有云层覆盖的天气条件会使人工混交林生态系统的碳吸收能力有所提高。

关键词: 晴空指数; 散射辐射; 净碳交换; 光合有效辐射; 人工混交林

Impacts of solar radiation on net ecosystem carbon exchange in a mixed plantation in the Xiaolangdi Area

LIU Jia¹, TONG Xiaojuan^{1,*}, ZHANG Jinsong², MENG Ping², LI Jun³, ZHENG Ning²

1 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Light quantity and quality strongly influence plant growth. Solar radiation is one of the main environmental factors driving vegetation carbon assimilation. As one of the natural climatic variables, clouds change the fraction of diffuse radiation arriving on the land surface and can influence carbon dioxide exchange between vegetation and the atmosphere. In this study, CO₂ flux was continuously measured during the vegetative growing season (June–August) from 2006 to 2008 by the eddy covariance systems in a mixed plantation in the Xiaolangdi area, Henan province. The clearness index (k_t) was used to describe the effects of cloudiness on solar radiation. Clear mornings and afternoons were identified based on the change of k_t with solar elevation (β) at a half-day scale. The impacts of cloudiness on the net ecosystem exchange of carbon dioxide (NEE) were investigated to reveal the mechanism of changes in coordinate of solar radiation and other

基金项目: 国家自然科学基金(31100322); 国家林业局公益性行业项目(GYHY20110400904); 北京林业大学科技创新计划项目(YX2011-19)

收稿日期: 2013-08-18; **修订日期:** 2014-03-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tongxjsxbs@sina.com

environmental factors on the net carbon uptake by the mixed plantation. The results showed that net CO_2 uptake was higher under cloudy skies than that under clear skies. Under cloudy sky conditions, light-saturated maximum photosynthetic rate ($P_{\max}$) increased by 38%, 58% and 55% and ecosystem apparent quantum yield (α) increased by factors of 2.6, 1.9 and 2.2 for the mid-growing seasons in 2006, 2007 and 2008, respectively, when compared to clear sky conditions. This work indicates that net carbon exchange could improve in the mixed plantation under cloudy skies relative to clear skies. For a given solar elevation angle interval, when the sky conditions changed from clear to cloudy, total solar radiation received by the ecosystem decreased, and balance of diffuse and direct components of solar radiation received by the ecosystem changed as well. Correspondingly, other environmental factors (T_a , VPD , etc.) also changed. Those changes can influence carbon exchange between forest ecosystem and the atmosphere. During cloudy days, the increase in diffuse radiation received by the ecosystem was more easily absorbed by shaded leaves for photosynthesis in forest canopy with higher leaf area index. Photosynthetically active radiation (PAR) and vapor pressure deficit (VPD) were enhanced with the increase of k_t , but diffuse PAR first increased then decreased with the increase of k_t . Under cloudy sky conditions, the light distribution is more even and the diffuse radiation received by the forest ecosystem is greater, which benefits photosynthesis of the shaded leaves. VPD is an important factor that affects stomatal conductance. Therefore, the decrease in VPD associated with cloudy conditions can enhance canopy photosynthesis. Temperature is one of the main environmental factors controlling ecosystem respiration. Air temperature declined with the reduction of k_t . Net CO_2 uptake reached its maximum when k_t ranged between 0.4 and 0.5 (the average value was 0.44). When the value of k_t was more than 0.5, net CO_2 uptake decreased. It is suggested that the increased diffuse PAR , decreased VPD and decreased air temperature under cloudy skies may improve ecosystem photosynthesis and reduce ecosystem respiration, leading to an increase in net carbon uptake in the mixed plantation ecosystem.

Key Words: clearness index; diffuse radiation; photosynthetically active radiation; net ecosystem exchange; mixed plantation

植被-大气间 CO_2 交换研究对准确评价陆地生态系统碳收支有重要意义^[1]。在植物生长季节,太阳辐射作为生态系统光合作用碳吸收的驱动力,极大地影响着植物的生长发育^[2-3]。太阳辐射经过大气及云的遮挡和削弱后分为直接辐射和散射辐射,其比例的不同会导致生态系统的气象因子发生变化,从而影响生态系统和大气之间的碳交换过程。太阳辐射、温度和水分是控制陆地生态系统与大气之间的二氧化碳交换的主要环境因子^[4-5]。云作为自然的一种天气要素,强烈影响着近地面的环境状况^[6-7]。云能够改变到达地面的太阳辐射中散射辐射所占有的比例,并且导致了环境中其他因子如:饱和差(VPD)、气温(T_a)和土壤温度的改变,进而显著影响碳交换^[8-10]。

研究表明,散射辐射能够提高生态系统的净碳吸收^[3,11-13]。Gu 等^[6]对加拿大寒带白杨林和温带落叶混交林进行了比较研究,结果显示,多云条件下,虽然总光合有效辐射减少,但云的存在导致了散射

辐射的增加、气温的降低和水分胁迫的减少,进而减少叶片和土壤呼吸,促进了冠层光合作用,提高了光能利用率和净碳吸收;张弥等^[14]在对长白山阔叶红松林的研究中发现,在植被生长旺季,天空有云层覆盖时光合能力比晴朗无云时有所提高,在受一定云层影响的中等太阳辐射条件下有利于该生态系统的碳吸收。云层使得散射辐射增加,气温和湿度降低,植物呼吸作用有所减缓,碳素同化作用增强^[3,10]。Bai 等^[3]在对高山草原和玉米农田的对比研究中发现,净碳交换(NEE)对光合有效辐射(PAR)的响应在多云天气下比晴朗天气下更加明显。

近年来,大气污染、气溶胶粒子增加等环境问题日趋严重^[15]。云层和大气气溶胶含量的变化给地面接收到的直接辐射和散射辐射带来很大影响^[16-17]。我国华北地区的大气环境往往受到西北部地区沙尘的影响。大量滞留在大气中的沙尘,成为对流层气溶胶的主要成分之一,影响地-气系统辐射能收支,从而影响区域的气候及生态环境^[18]。近 50

年来,我国太阳总辐射和直接辐射值以下降趋势为主,而华北区站点下降趋势尤为明显;自 2000 年以来,散射辐射呈上升趋势^[15]。森林是陆地生态系统重要的碳汇。太阳辐射是生态系统进行碳交换的驱动因子,极大地影响着森林生态系统的碳汇大小。研究太阳辐射变化对碳通量的影响有利于加深对碳汇的理解,并为森林碳循环模拟和预测工作的开展奠定了基础。目前,有关太阳辐射对生态系统碳交换的影响主要在温带^[10,19-20]、亚热带森林^[10,21-23],在暖温带相关研究则较少。因此,在华北地区开展太阳辐射对森林生态系统净碳交换影响的研究具有重要意义。

本研究利用 2006—2008 年黄河小浪底人工混交林生长季(6—8 月)的碳通量和微气象数据,探究太阳辐射对该生态系统净碳交换(*NEE*)的影响,揭示太阳辐射和其他环境因子协同变化对该生态系统净碳吸收的影响机制,为区域人工林生态系统碳收支模型的构建与预测提供理论依据和数据支持。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

本研究在国家林业局黄河小浪底森林生态系统定位研究站站(35°01'N、112°28'E,平均海拔高度为 410 m)进行。该站位于河南省济源市,处黄河中游流域,紧连太行山,面积 7210 hm²。小浪底实验区具有典型的暖温带亚湿润季风气候特征,雨热同季,水热资源较为丰富。年平均气温 12.4—14.3 °C,全年日照时数为 2367.7 h,年平均降水量 641.7 mm。受季风气候的影响,四季气候分明,降水季节性分配不均匀,6—8 月平均降水量为 438.0 mm,占全年的 68.3%。研究区主要树种为栓皮栎(*Quercus variabilis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*),林龄分别为 32、30 和 28a,平均株高分别为 10.5、8.2 和 9.3 m。生长季植被叶面积指数(LAI)为 6.3。林下灌丛主要有黑枣(*Ziziphus jujuba* Mill. var. *inermis* (Bunge) Rehd.)、扁担木(*Grewia biloba* var. *parviflora*)、荆条(*Vitex negundo* L. var.)、小叶鼠李(*Rhamnus bungeana* J. Vass.)等;草本主要有隐子草(*Crpsis aculeata* (L.) Ait.)、狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)。土壤种类主要为棕壤和石灰岩风化母质淋溶性褐土。

1.2 碳通量和微气象观测

开路涡度相关观测系统(OPEC)安装在通量塔 30 m 处。涡度相关系统包括红外 CO₂/H₂O 气体分析仪(Model LI-7500, Li-Cor, Nebraska)、三维超声风速仪(Model CAST3, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah)。数据采用 CR5000 型采集器自动采集(Model CR5000, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah),采样频率为 10Hz,记录储存数据,每 30 min 输出一组平均值。

微气象梯度观测系统包括 7 层 AR-100 风速计(Vector Instruments, UK)和 7 层 HMP-45C 型温湿度传感器(Vaisala, Finland)(安装高度分别为 7、10、11、13、17、24、31 m)。此外,在 27 m 高度处,安装了 CNR-1 型净辐射表和 CM11 型总辐射表(Kipp and Zonen)、Li-190SB 型点状光量子表(Li-Cor Inc., USA)、气压计(Model 52203)和雨量计(Model 52203, RM Young, Inc)等。上述仪器与 CR23x 型数据采集器(Campbell Sci., USA)相连,每 30 min 输出一组平均值。

1.3 数据处理

1.3.1 通量数据处理

由于天气状况、大气稳定度等自然因素和仪器响应及供电系统故障等原因,通量观测会有异常数据以及数据缺失的情况发生^[24],因此需要对获取的 30 min CO₂通量数据进行预处理。

本研究采用以下步骤处理和插补每 30 min 的通量数据:(1)两次坐标旋转;(2)WPL 校正因热量和水汽的变化造成空气密度改变的通量数据^[25];(3)异常、不合理数据的剔除;(4)对以上经过初步筛选的数据计算出月平均值和方差,与平均值相差超过 3 倍方差的数值也要剔除掉;(5)利用下列方法插补被去除的数据和缺失的数据:小于 2 h 的缺失数据用线性内插法插补;白天大于 2 h 的缺失数据采用平均日变化法(MDV)进行插补^[24]。

1.3.2 晴空指数的定义

生态系统所接收的散射辐射与云密切相关^[26]。通常用晴空指数(k_t)来表征云的厚薄^[27]。晴空指数 k_t 是云量多少的重要标识。它不仅能反映到达地面的太阳辐射照度,还能反映太阳辐射穿越大气时的状况和太阳辐射受到的影响。当 k_t 接近于 0 时,代表太阳辐射弱,云层完全覆盖;当 k_t 接近于 1 时,表

示太阳辐射较强,晴朗无云^[14]。 k_t 对太阳辐射影响的研究中已被广泛应用^[28-30]。地球水平面上接收的太阳总辐射(S)与地球大气层上方平行于地表面上接收的总太阳辐射(S_e)的比率被定义为晴空指数:

$$k_t = \frac{S}{S_e} \quad (1)$$

$$S_e = S_{sc} [1 + 0.033 \cos(360t_d/365)] \sin\beta \quad (2)$$

$$\sin\beta = \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega \quad (3)$$

式中, S_{sc} 为太阳常数(1370 W/m^2), t_d 为日序数, β 为太阳高度角, φ 为纬度, δ 为太阳赤纬, ω 为时角。

1.3.3 晴、阴天的界定

要确定云量对 NEE 的影响,就需要界定和辨别晴朗天气。黄河小浪底人工混交林在 6—8 月处于生长旺季,该时期对应的气候是炎热多雨,完整一天都是晴朗无云天气的情况较少。因此,本文以半天为基础,利用研究期间内晴空指数随太阳高度角的变化及与其正弦值的关系分别对晴朗的上午和下午进行判断^[6]。

晴朗的上午或下午的区分主要基于 3 点: 1) 绘制晴空指数随太阳高度角变化的曲线; 2) 选出晴空指数高于 0.45(k_t) 并随太阳高度角 β 平滑上升的上午或者下午; 3) 根据前两步得到的数据,绘制 k_t 随太阳高度角正弦值 ($\sin\beta$) 的变化图,选择晴空指数 (k_t) 和 $\sin\beta$ 的曲线能够形成集中散点图的数据,将偏离主要变化趋势的数据排除,确定出晴朗上午或下午^[10]。

图 1 显示了在晴朗天气条件下, k_t 和 $\sin\beta$ 之间的关系。由图 1 可以看出,晴朗的上午和下午的关系存在一种不对称的现象,这和 Zhang 等^[10]在对长白山站点的研究结果类似。下午的曲线位于上午曲线的上方,说明下午晴空指数受太阳高度角正弦的影响更为明显。这可能是由于早晨大气中的水汽和颗粒物较多,影响了晴空指数随太阳高度角的变化。

1.3.4 光合有效辐射中散射辐射 (PAR_{dif}) 的计算

光合有效辐射中的散射辐射可根据晴空指数 k_t 和太阳高度角 β 的值计算得出^[6,31]:

$$PAR_{\text{dif}} = PAR \frac{[1 + 0.3(1 - q^2)] q}{1 + (1 - q) \cos^2(90 - \beta) \cos^3\beta} \quad (4)$$

$$q = \frac{S_f}{S_e} / k_t \quad (5)$$

当 $0 \leq k_t \leq 0.3$, $S_f/S_e \leq k_t$ 时,

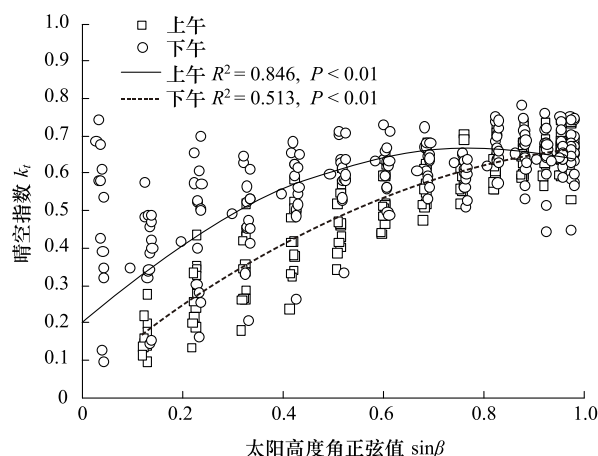


图 1 晴朗天气条件下,晴空指数与太阳高度角正弦的关系 (2006 年 6—8 月)

Fig.1 Relationship between the clearness index (k_t) and sine of solar elevation angles under clear sky conditions from June to August in 2006

$$S_f/S_e = k_t (1.020 - 0.254k_t + 0.0123\sin\beta) \quad (6)$$

当 $0.3 \leq k_t \leq 0.78$, $0.1k_t \leq S_f/S_e \leq 0.97k_t$ 时,

$$S_f/S_e = k_t (1.400 - 1.749k_t + 0.177\sin\beta) \quad (7)$$

当 $0.78 \leq k_t$, $0.1 \leq k_t \leq S_f/S_e$ 时,

$$S_f/S_e = k_t (0.486k_t - 0.182\sin\beta) \quad (8)$$

式中, PAR 是总光合有效辐射, PAR_{dif} 是光合有效辐射中的散射辐射, S_f 是地球表面接收的总散射辐射 (W/m^2)。

2 结果分析与讨论

2.1 不同天气条件下 NEE 对 PAR 的响应

太阳辐射是光合作用的驱动力。本文首先对晴天和多云天气下 NEE 对 PAR 的响应进行了研究。NEE 对光的响应方程为^[32-35]:

$$NEE = - \frac{\alpha PAR P_{\text{max}}}{\alpha PAR + P_{\text{max}}} + R_e \quad (9)$$

式中, PAR 是光合有效辐射 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), α 是生态系统的初始量子效率 ($\text{mgCO}_2/\mu\text{mol}$), P_{max} 为达到光饱和时的最大光合速率 ($\text{mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), R_e 为白天生态系统的呼吸速率 ($\text{mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。 α 与 P_{max} 是生态系统植物光合作用特性的两个重要的生理参数。 α 表示植被对光量子的利用能力,反映了植物对弱光的利用效率^[36], P_{max} 表示植被潜在光合能力^[14]。本文中,当 NEE 是负值时,表示生态系统净吸收 CO_2 ,反之为净释放 CO_2 。

云层增加会减少直接辐射,增加散射辐射。与晴天条件相比,多云天气下植被的 $P_{\max}$ 比较大^[4,37]。对晴朗天气和多云天气条件下黄河小浪底人工混交林的 NEE 光响应曲线进行拟合后发现,晴朗天气下 NEE 的值大于多云天气下的值(图 2)。2006—2008

年植物生长旺季,多云天气下的 α 分别是晴天天气的 2.6、1.9 和 2.2 倍; $P_{\max}$ 在多云天气比晴空天气下分别提高了 38%、58% 和 55%(表 1)。这说明天空有云层覆盖时,人工混交林生态系统对弱光的利用效率增强,其光合能力有所提高。

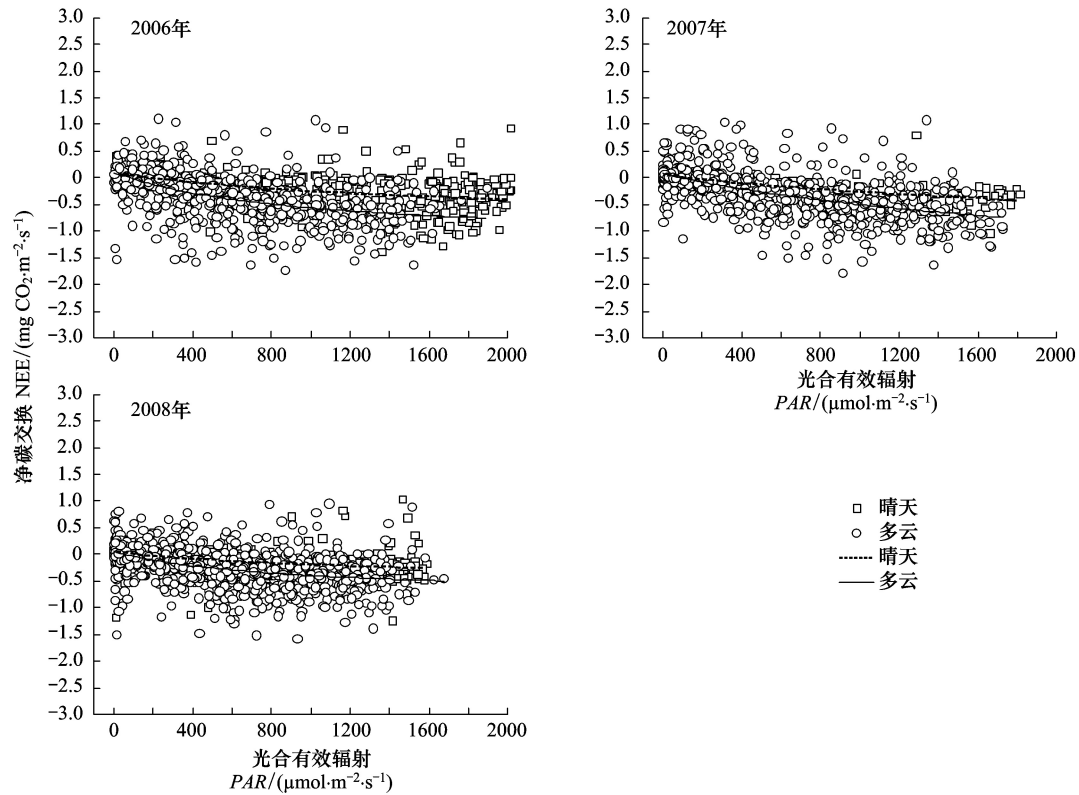


图 2 2006—2008 年 6—8 月人工混交林晴朗天气和多云天气下的光响应曲线
Fig.2 Light response curves of the mixed plantation in clear and cloudy skies from June to August in the years from 2006 to 2008

表 1 黄河小浪底人工混交林生态系统 2006—2008 年 6—8 月晴朗与多云天气下光响应参数

Table 1 Light response parameters of the mixed plantation in the Xiaolangdi area under clear and cloudy skies from June to August in the years 2006—2008

	2006		2007		2008	
	多云天气	晴朗天气	多云天气	晴朗天气	多云天气	晴朗天气
初始量子效率 $\alpha/(\mu\text{mol}/\mu\text{mol})$	0.031	0.012	0.019	0.010	0.022	0.010
最大光合作用速率 $P_{\max}/(\text{mgCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	-1.270	-0.918	-1.895	-1.197	-0.822	-0.531
生态系统呼吸 $R_e/(\text{mgCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	0.100	0.089	0.080	0.053	0.051	0.052

2.2 不同晴空指数 k_t 下 NEE 的变化

为了进一步探讨多云对黄河小浪底人工混交林生态系统 NEE 的影响,本文对 NEE 随晴空指数的变化进行了分析。晴空指数通常范围是 0.05—0.85^[3]。本研究选择 30°—70°区间的太阳高度角并以 5°为间隔将数据进行分组,分别分析太阳辐射对 NEE 的影响,以消除太阳辐射随太阳高度角变化而

对 NEE 对 k_t 响应的效果^[3,14]。

NEE 随 k_t 的变化曲线能够反映出由于云层不同而变化的太阳辐射对森林生态系统净碳交换的影响^[14]。在人工混交林生长季,当 k_t 小于 0.4 时, NEE 随 k_t 增加而增加;当 k_t 在 0.4—0.5 时, NEE 达到最大;当 k_t 大于 0.5 时, NEE 随 k_t 增大而减小(图 3)。从表 2 中可以看出,2006—2008 年人工混交林生态

系统生长季 NEE 达到最大的 k_t 平均值为 0.44。这一结果表明,相对于太阳辐射较强的晴朗天气,有一定云层覆盖的中等太阳辐射条件有利于该生态系统对碳的吸收。这一发现与以往的研究一致:在多云条件下,晴空指数 k_t 在 0.4—0.7 之间时,温带森林生态系统的 NEE 最大^[6,38-39];在阿柔草地,当 k_t 落在 0.4

和 0.7 之间时, NEE 达到其最大值,而盈科玉米农田, k_t 在 0.5—0.7 之间时达到最大值^[3];Zhang 等^[10] 在云量对长白山和鼎湖山森林生态系统净碳交换影响的研究中发现, k_t 在 0.4—0.6 之间时,两个生态系统的 NEE 达到最大。

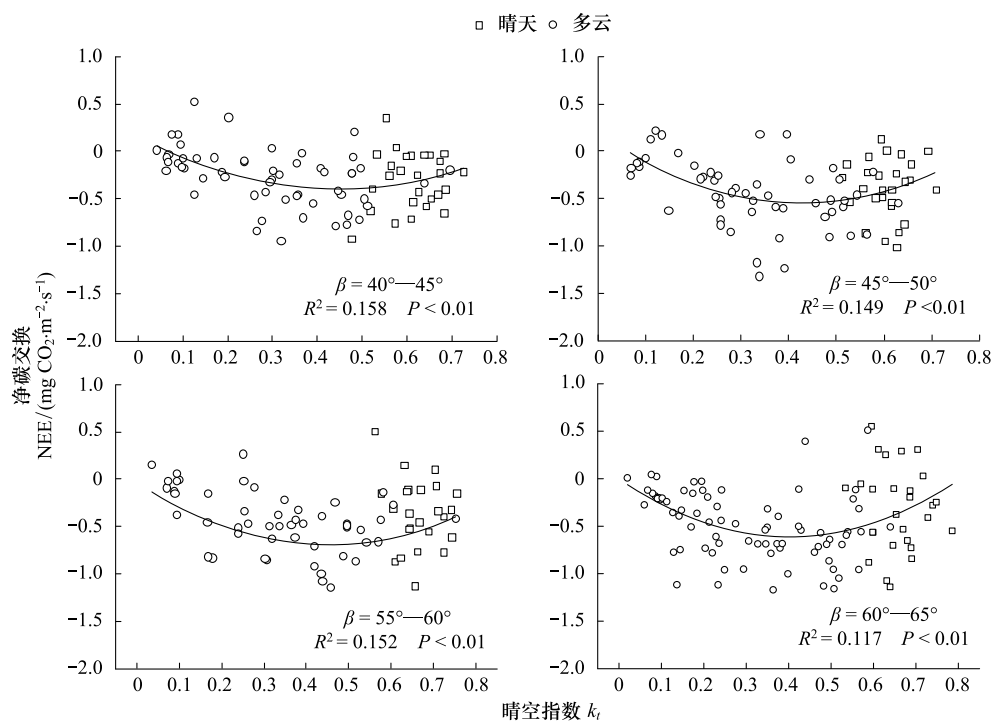


图3 不同太阳高度角下 NEE 与晴空指数 k_t 的关系(以 2006 年 6—8 月为例)

Fig.3 Relationship between NEE and the clearness index (k_t) for different intervals of solar elevation angles from June to August in 2006

2.3 NEE 对云量变化的响应

对 2006—2008 年 6—8 月黄河小浪底人工混交林生态系统的研究发现,当 k_t 约为 0.44 时, NEE 达到最大(图 3)。这表明,在有云层覆盖的天气条件下,黄河小浪底人工混交林生态系统净碳吸收最高。

在人工混交林生态系统旺盛生长季(6—8 月),由太阳高度角 β 大于 20° 时 k_t 的频率分布直方图可以看出,该站晴空指数 k_t 出现频率较高的值为 0.3—0.5,并在 0.5 出现的频率最大(图 4)。而使该生态系统 NEE 达到最大的晴空指数 k_t 在 0.4—0.5 之间(图 3)。因此,在植物生长季,该地区的多云天气条件促进了人工混交林生态系统的净碳吸收。

2.4 环境因子对云量变化的响应及其对 NEE 的影响

光照是控制 NEE 的主要因素^[21]。温度和饱和

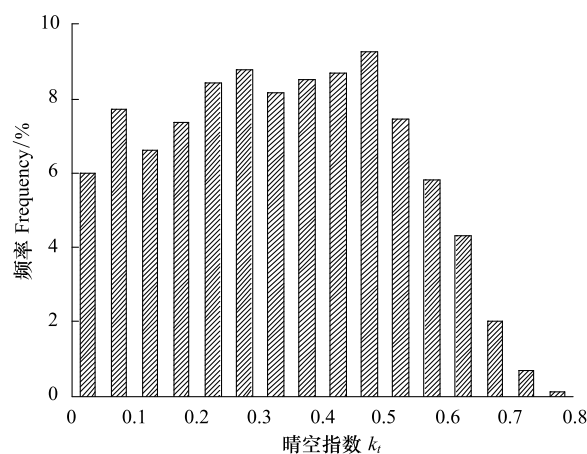


图4 2006—2008 年 6—8 月晴空指数 k_t 的频率变化分布

Fig.4 Frequency distributions of the variation of the clearness index (k_t) from June to August in the years 2006 to 2008

差也共同影响着 NEE ^[21]。赵仲辉等^[21] 在对湖南会同杉木人工林生态系统的研究发现 NEE 与 PAR 、

表 2 不同太阳高度角范围内使 NEE 达到最大的 k_t 值

Table 2 Values of k_t when NEE reaches its maximum for different intervals of solar elevation angles from June to August in the years 2006—2008

太阳高度角/(°) Solar elevation angle (β)	晴空指数 Clearness index (k_t)		
	2006	2007	2008
30—35	0.49	0.42	0.42
35—40	0.40	0.41	0.39
40—45	0.45	0.48	0.40
45—50	0.43	0.41	0.46
50—55	0.45	0.53	0.43
55—60	0.45	0.44	0.39
60—65	0.40	0.44	0.50
65—70	0.42	0.51	0.38
平均 Average	0.44	0.46	0.42

温度等气象因子存在明显的相关性。在一定太阳高度角下,由于晴阴天的变化,生态系统接收的太阳辐射以及生态系统所接受的散射辐射和直接辐射之间的平衡情况会发生改变。相应地,其他环境因素(如

饱和差、气温)也会有所改变。于是,这些变化会影响森林生态系统与大气之间的碳交换过程。研究表明,天空云量增多导致太阳辐射减弱,此时散射辐射在总辐射中所占的比例增加,这样会使更多的光穿过冠层上部达到下部^[38],叶片之间光分布更加平衡,提高了下层遮阴叶片的光合作用能力,进而增加了生态系统净碳吸收^[6,10,40]。

图 5 显示了研究站点总光合有效辐射 (PAR) 以及光合有效辐射中的散射辐射 (PAR_{dif}) 和晴空指数 (k_t) 的关系。总光合有效辐射随晴空指数的升高几乎成直线增加。然而,光合有效辐射中的散射辐射与晴空指数的关系却是非线性的。光合有效辐射中的散射辐射一般是先随晴空指数的增加而增加,当晴空指数在 0.4—0.5 之间的时候达到最大值,这与该站点 NEE 达到最大时,生态系统所接收的散射有效辐射的范围相一致(图 3,图 5)。这一结果表明,在多云天气下,黄河小浪底人工混交林生态系统的净碳吸收随着散射辐射的增加而增加。

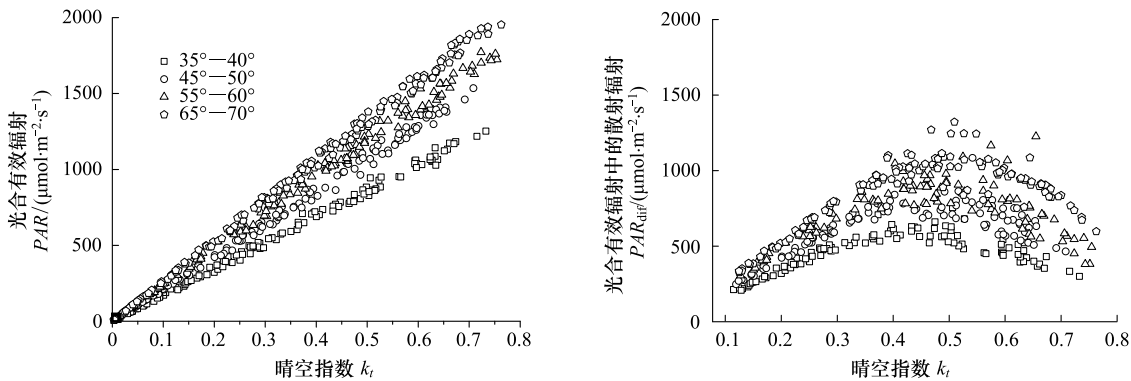


图 5 在选定的太阳高度角范围内,2006 年 6—8 月总光合有效辐射 (PAR) 和光合有效辐射散射辐射 (PAR_{dif}) 随晴空指数 k_t 的变化

Fig.5 Changes in total PAR and diffuse PAR with the clearness index (k_t) for selected intervals of solar elevation angle from June to August in 2006

VPD 是影响陆地生态系统与大气间碳交换的重要因子之一^[3,41]。 VPD 通过影响气孔导度来影响生态系统与大气间碳和能量的交换过程^[42-43]。 VPD 的降低可诱导气孔开放,从而提高叶片光合作用^[44]。通常,植物的光合速率会随着饱和差的升高而下降^[45]。因此,多云天气条件下较小的 VPD 提高了生态系统的光合作用^[46],促进了人工混交林的净碳吸收(图 2 和图 6)。

温度是控制生态系统呼吸过程的主要因素之

一^[47-49]。在一定的太阳高度角范围内,人工混交林生态系统出现了气温(T_a)随着晴空指数 k_t 降低而下降的情况(图 6)。这表明多云天气情况下气温下降会导致该生态系统呼吸作用的减少。

3 结论

本研究利用涡度相关法研究了太阳辐射对黄河小浪底人工混交林净生态系统碳交换 NEE 的影响,得出的主要结论为:

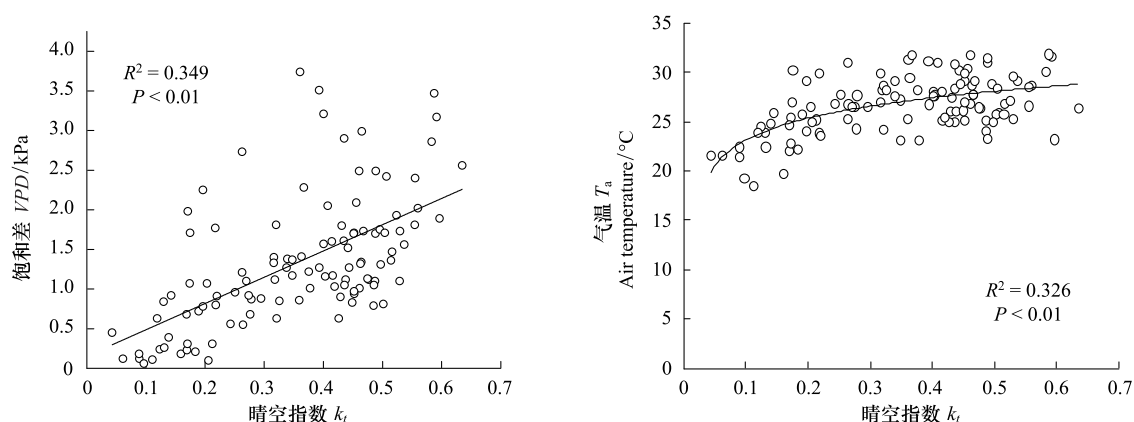


图6 在一定的太阳高度角范围内(50°—55°),饱和差(VPD)、气温(T_a)与 k_t 的关系(以2008年6—8月为例)

Fig.6 Changes in vapor pressure deficit (VPD) and air temperature with the clearness index (k_t) for selected intervals of solar elevation angle (50°—55°) in the mixed plantation from June to August in 2008

(1) 与晴朗天气相比,人工混交林生态系统在多云天气条件下净碳交换会增加。主要是由于:多云天气条件下, PAR_{dif} 的增加。由于散射辐射在林冠中具有更强的透射性,对冠层内叶下的光合作用有促进作用。此外,晴天天气条件下,强烈的直接辐射会使得植被光合作用出现光饱和现象,从而抑制了光合速率的提升。

(2) k_t 小于0.44时,人工混交林生态系统净碳交换量一开始随着晴空指数增加。当 k_t 大于0.44时,净碳交换量则随 k_t 的增加而下降。多云条件下,气温和饱和差的下降促进了冠层光合作用,减少了呼吸作用。因此,在有云覆盖的天气条件下,VPD和气温的降低是黄河小浪底人工混交林生态系统净碳交换增加的另一个主要原因。

References:

- [1] Wu J B, Guan D X, Zhang M, Han S J, Yu G R, Sun X M. Carbon budget characteristics of the broadleaved Korean pine forests in Changbaishan Mountains. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(1): 1-6.
- [2] Guan D X, Wu J B, Zhao X S, Han S J, Yu G R, Sun X M, Jin C J. CO_2 fluxes over an old, temperate mixed forest in northeastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3/4): 138-149.
- [3] Bai Y F, Wang J, Zhang B C, Zhang Z H, Liang J. Comparing the impact of cloudiness on carbon dioxide exchange in a grassland and a maize cropland in northwestern China. *Ecological Research*, 2012, 27(3): 615-623.
- [4] Law B E, Falge E, Gu L H, Baldocchi D, Pakwin P, Berbigier P, Davis K, Dolman A J, Falk M, Fuentes J D, Goldstein A, Granier A, Grelle A, Hollinger D, Janssens I A, Jarvis P, Jensen N O, Katul G, Mahli Y, Matteucci G, Meyers T, Monson R, Munger W, Oechel W, Olson R, Pilegaard K, Paw K T, Thorgeirsson H, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 97-120.
- [5] Baldocchi D. "Breathing" of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany*, 2008, 56(1): 1-26.
- [6] Gu L H, Fuentes J D, Shugart H H, Staebler R M, Black T A. Responses of net ecosystem exchanges of carbon dioxide to changes in cloudiness: results from two North American deciduous forests. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1999, 104(D24): 31421-31434.
- [7] Bar-Or R Z, Koren I, Altaratz O. Estimating cloud field coverage using morphological analysis. *Environmental Research Letters*, 2010, 5(1): 1-6.
- [8] Zhao L, Li Y N, Xu S X, Zhou H K, Gu S, Yu G R, Zhao X Q. Diurnal, seasonal and annual variation in net ecosystem CO_2 exchange of an alpine shrubland on Qinghai-Tibetan plateau. *Global Change Biology*, 2006, 12(10): 1940-1953.
- [9] Aires L M I, Pio C A, Pereira J S. Carbon dioxide exchange above a Mediterranean C_3/C_4 grassland during two climatologically contrasting years. *Global Change Biology*, 2008, 14(3): 539-555.
- [10] Zhang M, Yu G R, Zhang L M, Sun X M, Wen X F, Han S J, Yan J H. Impact of cloudiness on net ecosystem exchange of carbon dioxide in different types of forest ecosystems in China. *Biogeosciences*, 2010, 7(2): 711-722.
- [11] Gu L H, Baldocchi D, Wofsy S, Munger J, Michalsky J, Urbanski S, Boden T. Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: enhanced photosynthesis. *Science*, 2003, 299(5615): 2035-2038.
- [12] Sun J S, Zhou G S. Review of advances in measurements and effects of diffuse radiation on terrestrial ecosystem productivity. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(4): 452-461.

- [13] Ren Y F, Wang C Y, Zhao Y X. Review on impact of atmospheric aerosol radiation effect on crops and ecological system. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(4): 233-540.
- [14] Zhang M, Yu G R, Zhang L M, Sun X M, Wen X F, Han S J. Effects of solar radiation on net ecosystem exchange of broadleaved-korean pine mixed forest in Changbai Mountain, China. Journal of Plant Ecology: Chinese Version, 2009, 33(2): 270-282.
- [15] Ma J Y, Liang H, Luo Y, Li S K. Variation trend of direct and diffuse radiation in China over recent 50 years. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 853-866.
- [16] Niyogi D, Chang H I, Saxena V K, Holt T, Alapaty K, Booker F, Chen F, Davis K J, Holben B, Matsui T, Meyers T, Oechel W C, Pielke R A, Well R, Wilson K, Xue Y K. Direct observations of the effects of aerosol loading on net ecosystem CO₂ exchanges over different landscapes. Geophysical Research Letters, 2004, 31(20), L20506, doi: 10.1029/2004GL020915.
- [17] Min Q L. Impacts of aerosols and clouds on forest-atmosphere carbon exchange. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2005, 110(D6): D06203, doi: 10.1029/2004JD004858.
- [18] Jia X, Wang W C, Chen Y H, Huang J P, Chen J M, Zhang H, Bai H T, Zhang P. Influence of dust aerosols on cloud radiative forcing over Northern China. China Environmental Science, 2010, 30(8): 1009-1014.
- [19] Zhou L Y, Jia B R, Zeng W, Wang Y, Zhou G S. Net ecosystem CO₂ exchange of virgin *Larix gmelinii* forest and its characteristics of light response. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(24): 6919-6926.
- [20] Zhao Z H, Zhang L P, Kang W X, Tian D L, Xiang W H, Yan W D, Peng C H. Characteristics of CO₂ flux in a Chinese fir plantation ecosystem in Huitong County, Hunan Province. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(11): 6-12.
- [21] Liu Y F, Yu G R, Wen X F, Wang Y H, Song X, Li J, Sun X M, Yang F T, Chen Y R, Liu Q J. Seasonal dynamics of CO₂ fluxes from subtropical plantation coniferous ecosystem. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(S2): 99-109.
- [22] Peng Z H, Wang Y, Ren H Q, Sun Q X, Zhou J X. Research on the variation of carbon flux and the relationship of environmental factors and carbon flux of populus forest ecosystem in the reaches of Yangtze river in Anqing. Forest Research, 2009, 22(2): 237-242.
- [23] Jiang Y, Hu H B, Zhang X S, Xue J H. The carbon flux and its environmental factors in a north subtropical secondary oak forest ecosystem. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2011, 35(3): 38-42.
- [24] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grunwald T, Hollinger D, Jensen N O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff H, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik U, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(1): 43-69.
- [25] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980, 106(447): 85-100.
- [26] Shen Y B, Zhao Z C, Shi G Y. The progress in variation of surface solar radiation, factors and probable climatic effects. Advances in Earth Science, 2008, 23(9): 915-923.
- [27] Fan Y Z, Zhang X Z, Shi P L. Influence of diffuse radiation on the net CO₂ exchange of alpine meadow ecosystem on Tibet Plateau. Geographical Research, 2009, 28(6): 1673-1681.
- [28] Tsubo M, Walker S. Relationships between photosynthetically active radiation and clearness index at Bloemfontein, South Africa. Theoretical and Applied Climatology, 2005, 80(1): 17-25.
- [29] Woyte A, Belmans R, Nijs J. Fluctuations in instantaneous clearness index; analysis and statistics. Solar Energy, 2007, 81(2): 195-206.
- [30] Okogbue E C, Adedokun J A, Holmgren B. Hourly and daily clearness index and diffuse fraction at a tropical station, Ile-Ife, Nigeria. International Journal of Climatology, 2009, 29(8): 1035-1047.
- [31] Reindl D T, Beckman W A, Duffie J A. Diffuse fraction correlations. Solar Energy, 1990, 45(1): 1-7.
- [32] Greco S, Baldocchi D D. Seasonal variations of CO₂ and water vapour exchange rates over a temperate deciduous forest. Global Change Biology, 1996, 2(3): 183-197.
- [33] Song X, Liu Y F, Xu X F, Yu G R, Wen X F. Comparison study on carbon dioxide, water and heat fluxes of the forest ecosystem in red earth hilly zone over winter and spring. Resource Science, 2004, 26(3): 97-104.
- [34] Pilegaard K, Hummelsh J P, Jensen NO, Chen Z. Two years of continuous CO₂ eddy-flux measurements over a Danish beech forest. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(1): 29-41.
- [35] Wang H M, Saigusa N, Yamamoto S, Kondo H, Hirano T, Toriyama A, Fujinuma Y. Net ecosystem CO₂ exchange over a larch forest in Hokkaido, Japan. Atmospheric Environment, 2004, 38(40): 7021-7032.
- [36] Tong X J, Zhang J S, Meng P, Yi C J, Gao J, Huang H, Guo L. Relationship between net ecosystem carbon exchange and meteorological factors in a plantation in the hilly area of the North China. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6638-6645.
- [37] Goulden M L, Daube B C, Fan S M, Sutton D J, Bazzaz A, Munger J W, Wofsy S. Physiological responses of a black spruce forest to weather. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D24): 28987-28996.
- [38] Letts M G, Lafleur P M, Roulet N T. On the relationship between cloudiness and net ecosystem carbon dioxide exchange in a peatland ecosystem. Ecoscience, 2005, 12(1): 53-59.
- [39] Urban O, Janouš D, Acosta M, Czerný R, Marková I, Navrátil M, Pavelka M, Pokorný R, Šprtová M, Zhang R, Špunda V, Grace J, Marek M V. Ecophysiological controls over the net ecosystem exchange of mountain spruce stand. Comparison of the response in direct vs. diffuse solar radiation. Global Change Biology, 2007, 13(1): 157-168.

- [40] Alton P B. Reduced carbon sequestration in terrestrial ecosystems under overcast skies compared to clear skies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(10): 1641-1653.
- [41] Leuning R. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C_3 plant. *Plant, Cell & Environment*, 1995, 18(4): 339-355.
- [42] Bunce J A. Direct and acclimatory responses of stomatal conductance to elevated carbon dioxide in four herbaceous crop species in the field. *Global Change Biology*, 2001, 7(3): 323-331.
- [43] Damour G, Simonneau T, Cochard H, Urban L. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant, Cell & Environment*, 2010, 33(9): 1419-1438.
- [44] Collatz G J, Ball J T, Griwet C, Berry J A. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1991, 54(2/4): 107-136.
- [45] Cunningham S C. Photosynthetic responses to vapour pressure deficit in temperate and tropical evergreen rainforest trees of Australia. *Oecologia*, 2005, 142(4): 521-528.
- [46] Freedman J M, Fitzjarrald D R, Moore K E, Sakai R K. Boundary layer cloud climatology and enhanced forest-atmosphere exchange // *The 23rd Conference on Agricultural and Forest Meteorology*. Boston: American Meteorological Society, 1998: 41-44.
- [47] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 1992, 44(2): 81-89.
- [48] Guan D X, Wu J B, Yu G R, Zhao X S, Han S J, Jin C J. Meteorological control on CO_2 flux above broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbai Mountains. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(S1): 116-122.
- [49] Shi P L, Sun X M, Xu L L, Zhang X Z, He Y T, Zhang D Q, Yu G R. Net ecosystem CO_2 exchange and controlling factors in a steppe-Kobresia meadow on the Tibetan Plateau. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(S2): 207-218.
- [13] 任义方, 王春乙, 赵艳霞. 气溶胶辐射效应对作物及生态系统的影响综述. *中国农业气象*, 2010, 31(4): 233-540.
- [14] 张弥, 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 温学发, 韩士杰. 太阳辐射对长白山阔叶红松林净生态系统碳交换的影响. *植物生态学报*, 2009, 33(2): 270-282.
- [15] 马金玉, 梁宏, 罗勇, 李世奎. 中国近 50 年太阳直接辐射和散射辐射变化趋势特征. *物理学报*, 2011, 60(6): 853-866.
- [18] 贾璇, 王文彩, 陈勇航, 黄建平, 陈建民, 张华, 白鸿涛, 张萍. 华北地区沙尘气溶胶对云辐射强迫的影响. *中国环境科学*, 2011, 30(8): 1009-1014.
- [19] 周丽艳, 贾丙瑞, 曾伟, 王宇, 周广胜. 原始兴安落叶松林生长季净生态系统 CO_2 交换及其光响应特征. *生态学报*, 2010, 30(24): 6919-6926.
- [20] 赵仲辉, 张利平, 康文星, 田大伦, 项文化, 闫文德, 彭长辉. 湖南会同杉木人工林生态系统 CO_2 通量特征. *林业科学*, 2011, 47(11): 6-12.
- [21] 刘允芬, 于贵瑞, 温学发, 王迎红, 宋霞, 李菊, 孙晓敏, 杨凤亭, 陈永瑞, 刘琪璟. 千烟洲中亚热带人工林生态系统 CO_2 通量的季节变异特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(增刊 I): 91-102.
- [22] 彭镇华, 王妍, 任海青, 孙启祥, 周金星. 安庆杨树林生态系统碳通量及其影响因子研究. *林业科学研究*, 2009, 22(2): 237-242.
- [23] 蒋琰, 胡海波, 张学仕, 薛建辉. 北亚热带次生栎林碳通量及其影响因子研究. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(3): 38-42.
- [26] 申彦波, 赵宗慈, 石广玉. 地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能的气候效应最新研究进展. *地球科学进展*, 2008, 23(9): 915-923.
- [27] 范玉枝, 张宪洲, 石培礼. 散射辐射对西藏高原高寒草甸净生态系统 CO_2 交换的影响. *地理研究*, 2009, 28(6): 1673-1681.
- [33] 宋霞, 刘允芬, 徐小锋, 于贵瑞, 温学发. 红壤丘陵区人工林冬春时段碳、水、热通量的观测与分析. *资源科学*, 2004, 26(3): 96-104.
- [36] 同小娟, 张劲松, 孟平, 尹昌君, 高峻, 黄辉, 国琳. 华北低丘山地人工林生态系统净碳交换与气象因子的关系. *生态学报*, 2009, 29(12): 6638-6645.
- [48] 关德新, 吴家兵, 于贵瑞, 赵晓松, 韩士杰, 金昌杰. 气象条件对长白山阔叶红松林 CO_2 通量的影响. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 103-108.
- [49] 石培礼, 孙晓敏, 徐玲玲, 张宪洲, 何永涛, 张东秋, 于贵瑞. 西藏高原草甸化嵩草草甸生态系统 CO_2 净交换及其影响因子. *中国科学*, 2006, 36(增刊 I): 194-203.

参考文献:

- [1] 吴家兵, 关德新, 张弥, 韩士杰, 于贵瑞, 孙晓敏. 长白山阔叶红松林碳收支特征. *北京林业大学学报*, 2007, 29(1): 1-6.
- [12] 孙敬松, 周广胜. 散射辐射测量及其对陆地生态系统生产力影响的研究进展. *植物生态学报*, 2010, 34(4): 452-461.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.8 Apr., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Growth rates of marine planktonic ciliates; a review ZHANG Wuchang, LI Haibo, FENG Meiping, et al (1897)
- Research status and prospects on functions of urban forests in regulating the air particulate matter
..... WANG Xiaolei, WANG Cheng (1910)
- A review of snow-living Collembola ZHANG Bing, NI Zhen, CHANG Liang, et al (1922)

Autecology & Fundamentals

- Photosynthetic responses to changes in CO₂ concentration and soil moisture in leaves of *Securinega suffruticosa* from shell ridge
islands in the Yellow River Delta, China ZHANG Shuyong, XIA Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (1937)
- Quantities and spectral characteristics of DOM released from leaf and litterfall in *Castanopsis carlesii* forest and *Cunninghamia
lanceolata* plantation KANG Genli, YANG Yusheng, SI Youtao, et al (1946)
- Seasonal dynamics of leaf area index using different methods in the Korean pine plantation
..... WANG Baoqi, LIU Zhili, QI Yujiao, et al (1956)
- Influence of environmental changes on stoichiometric traits of nitrogen and phosphorus for *Larix gmelinii* trees
..... PING Chuan, WANG Chuankuan, et al (1965)
- Soil water in deep layers under different land use patterns on the Loess Tableland ... CHENG Liping, LIU Wenzhao, LI Zhi (1975)
- Water parameters of the branch of *Larrea tridentata* under different soil drought stress
..... ZHANG Xiangning, SUN Xiangyang, WANG Baoping, et al (1984)
- Effects of shading treatments on photosynthetic characteristics of *Juniperus sabina* Ant. seedlings
..... ZHAO Shun, HUANG Qiuxian, LI Yuling, et al (1994)
- Root distribution in typical sites of Lijiang ecotone and their relationship to soil properties
..... LI Qingshan, WANG Dongmei, XIN Zhongbao, et al (2003)
- The survival and above/below ground growth of *Haloxylon ammodendron* seedling
..... TIAN Yuan, TASHPOLAT · Tiyp, LI Yan, et al (2012)
- Effects of simulated acid rain on the physiological and ecological characteristics of *Rhododendron hybridum*
..... TAO Qiaojing, FU Tao, XIANG Xina, et al (2020)
- Karst cave bacterial calcium carbonate precipitation: the Shijiangjun Cave in Guizhou, China
..... JIANG Jianjian, LIU Ziqi, HE Qiufang, et al (2028)
- Migration of the 7th generation of brown planthopper in northeastern Guangxi Zhuang Autonomous Region, and analysis of source
areas QI Huihui, ZHANG Yunhui, JIANG Chunxian, et al (2039)

Population, Community and Ecosystem

- The dynamics and determinants of population size and spatial distribution of Common Cranes wintering in Poyang Lake
..... SHAN Jihong, MA Jianzhang, LI Yankuo, et al (2050)
- Effects of snow pack on wintertime soil nitrogen transformation in two subalpine forests of western Sichuan
..... YIN Rui, XU Zhengfeng, WU Fuzhong, et al (2061)
- Numerical classification, ordination and species diversity along elevation gradients of the forest community in Xiaolinling
..... CHEN Yun, WANG Hailiang, HAN Junwang, et al (2068)
- Phytoplankton community structures revealed by pigment signatures in Norwegian and Greenland Seas in summer 2012
..... WANG Xiaoying, ZHANG Fang, LI Juanying, et al (2076)
- Analysis of differences in insect communities at different altitudes in *Zanthoxylum bungeanum* gardens, Yunnan, China
..... GAO Xin, ZHANG Limin, ZHANG Xiaoming, et al (2085)
- The bacterial community changes after papermaking wastewater treatment with artificial wetland
..... GUO Jianguo, ZHAO Longhao, XU Dan, et al (2095)

- Ecological water requirement estimation of the rump lake in an extreme arid region of East Juyanhai
..... ZHANG Hua, ZHANG Lan, ZHAO Chuanyan (2102)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Spatial distribution patterns of species richness and hotspots of protected plants in Qinling Mountain
..... ZHANG Yinbo, GUO Liulin, WANG Wei, et al (2109)
- Impacts of solar radiation on net ecosystem carbon exchange in a mixed plantation in the Xiaolangdi Area
..... LIU Jia, TONG Xiaojuan, ZHANG Jinsong, et al (2118)
- Carbon density and distribution of *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in Hilly Loess Plateau
..... YANG Yujiao, CHEN Yunming, CAO Yang (2128)
- Dynamics of carbon storage at different aged *Koelreuteria paniclata* tree in Xiangtan Mn mining wasteland
..... TIAN Dalun, Li Xionghua, LUO Zhaozhui, et al (2137)

Resource and Industrial Ecology

- Contamination status of Pb and Cd and health risk assessment on vegetables in a mining area in southern Hunan
..... WU Yanming, LV Gaoming, ZHOU Hang, on storage at different age (2146)

Urban, Rural and Social Ecology

- Life cycle assessment and environmental & economic benefits research of important building external insulation materials in Beijing ...
..... ZHU Lianbin, KONG Xiangrong, WU Xian (2155)
- Effects of urban imperious surface on the habitat and ecophysiology characteristics of *Ginkgo biloba*
..... SONG Yingshi, LI Feng, WANG Xiaoke, et al (2164)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 杨永兴

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 8 期 (2014 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 8 (April, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010) 62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@ cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010) 64034563 E-mail: journal@ cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元

