

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 22 期 Vol.32 No.22 **2012**

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 32 卷 第 22 期

2012 年 11 月 (半月刊)

## 目 次

CO <sub>2</sub> 浓度和温度升高对噬藻体 PP 增殖的联合作用 .....	牛晓莹,程 凯,荣茜茜,等 (6917)
1956—2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局 .....	陈 军,王玉辉 (6925)
两个污水处理系统的能值与经济综合分析 .....	李 敏,张小洪,李远伟,等 (6936)
退化草地阿尔泰针茅种群个体空间格局及关联性 .....	赵成章,任 珩 (6946)
地表覆盖栽培对雷竹林凋落物养分及其化学计量特征的影响 .....	刘亚迪,范少辉,蔡春菊,等 (6955)
福州酸雨区次生林中台湾相思与银合欢叶片的 12 种元素含量 .....	郝兴华,洪 伟,吴承祯,等 (6964)
“雨花露”水蜜桃主要害虫与其捕食性天敌的关系 .....	柯 磊,施晓丽,邹运鼎,等 (6972)
大兴安岭林区 10 小时时滞可燃物湿度的模拟 .....	胡天宇,周广胜,贾丙瑞 (6984)
陕北风沙区不同植被覆盖下的土壤养分特征 .....	李文斌,李新平 (6991)
南方型杨树人工林土壤呼吸及其组分分析 .....	唐罗忠,葛晓敏,吴 麟,等 (7000)
黑河下游土壤水盐对生态输水的响应及其与植被生长的关系 .....	鱼腾飞,冯 起,刘 蔚,等 (7009)
树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应 .....	梅婷婷,赵 平,倪广艳,等 (7018)
外来植物紫茎泽兰入侵对土壤理化性质及丛枝菌根真菌(AMF)群落的影响 .....	于文清,刘万学,桂富荣,等 (7027)
基于 Landsat TM 的热带精细地物信息提取的模型与方法——以海南岛为例 .....	王树东,张立福,陈小平,等 (7036)
雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤水解酶活性的影响 .....	杨玉莲,吴福忠,杨万勤,等 (7045)
不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响 .....	王唯逍,刘小军,田永超,等 (7053)
木蹄层孔菌不同居群间生长特性、木质素降解酶与 SRAP 标记遗传多样性 .....	曹 宇,徐 晔,王秋玉 (7061)
加拿大一枝黄花入侵对土壤动物群落结构的影响 .....	陈 雯,李 涛,郑荣泉,等 (7072)
间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响 .....	张向前,黄国勤,卞新民,等 (7082)
接种 AM 真菌对玉米和油菜种间竞争及土壤无机磷组分的影响 .....	张宇亭,朱 敏,钱岩相注,等 (7091)
大亚湾冬季不同粒级浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系 .....	柯志新,黄良民,徐 军,等 (7102)
太湖水华期间有毒和无毒微囊藻种群丰度的动态变化 .....	李大命,叶琳琳,于 洋,等 (7109)
锌胁迫对小球藻抗氧化酶和类金属硫蛋白的影响 .....	杨 洪,黄志勇 (7117)
基于国家生态足迹账户计算方法的福建省生态足迹研究 .....	邱寿丰,朱 远 (7124)
能源活动 CO <sub>2</sub> 排放不同核算方法比较和减排策略选择 .....	杨喜爱,崔胜辉,林剑艺,等 (7135)
基于生境等价分析法的胶州湾围填海造地生态损害评估 .....	李京梅,刘铁鹰 (7146)
县级生态资产价值评估——以河北丰宁县为例 .....	王红岩,高志海,李增元,等 (7156)
<b>专论与综述</b>	
丛枝菌根提高宿主植物抗旱性分子机制研究进展 .....	李 涛,杜 娟,郝志鹏,等 (7169)
城市土壤碳循环与碳固持研究综述 .....	罗上华,毛齐正,马克明,等 (7177)
基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算方法综述 .....	董泰锋,蒙继华,吴炳方 (7190)
光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长影响研究进展 .....	吴明丽,李叙勇 (7202)
浮游动物化学计量学稳态性特征研究进展 .....	苏 强 (7213)
<b>研究简报</b>	
2010 年两个航次獐子岛海域浮游纤毛虫丰度和生物量 .....	于 莹,张武昌,张光涛,等 (7220)
基于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究 .....	杨锡涛,周学红,张 伟 (7230)
残落物添加对农林复合系统土壤有机碳矿化和土壤微生物量的影响 .....	王意锟,方升佐,田 野,等 (7239)
人工湿地不同季节与单元之间根际微生物多样性 .....	陈永华,吴晓芙,张珍妮,等 (7247)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 338 \* zh \* P \* ¥70.00 \* 1510 \* 36 \* 2012-11



**封面图说:** 水杉农田防护林中的小麦熟了——水杉曾广泛分布于北半球,第四纪冰期以后,水杉属的其他种类全部灭绝,水杉却在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存,成为旷世奇珍,野生的水杉是国家一级保护植物。由于水杉耐水,适应力强,生长极为迅速,其树干通直挺拔,高大秀颀,树冠呈圆锥形,姿态优美,自发现后被人们在中国南方广泛种植,不仅成为了湖边、道路两旁的绿化观赏植物,更成为了农田防护林的重要树种。此图中整齐划一的水杉防护林像忠实的哨兵一样,为苏北农村即将成熟的麦田站岗。

**彩图提供:** 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201110141517

胡天宇, 周广胜, 贾丙瑞. 大兴安岭林区 10 小时时滞可燃物湿度的模拟. 生态学报, 2012, 32(22): 6984-6990.

Hu T Y, Zhou G S, Jia B R. Simulating 10-hour time-lag fuel moisture in Daxinganling. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 6984-6990.

# 大兴安岭林区 10 小时时滞可燃物湿度的模拟

胡天宇<sup>1,3</sup>, 周广胜<sup>1,2,\*</sup>, 贾丙瑞<sup>1</sup>

(1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081;  
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**随着森林防火预报精细化的需求, 小时尺度可燃物湿度的准确模拟成为火险预报的关键。利用 2010 年 8 月连续无降雨天气条件下我国大兴安岭林区 10h 时滞可燃物湿度和相应气象因子的半小时动态观测资料, 从可燃物的失水和吸水过程对目前广泛使用的 Fosberg 模型和 Van Wagner 模型进行评估, 进而发展了准确模拟 10h 时滞可燃物失水和吸水过程的可燃物湿度模型。结果表明: Fosberg 模型对 10h 时滞可燃物的失水过程模拟较好 ( $R^2 = 0.96, P < 0.01$ ), 而 Van Wagner 模型对 10h 时滞可燃物的吸水过程模拟较好 ( $R^2 = 0.83, P < 0.01$ ), 但均不能独立地准确模拟 10h 时滞可燃物的湿度变化。通过分析可燃物失水与吸水过程, 考虑可燃物在静风条件下的水汽交换, 优化了 Van Wagner 模型参数, 建立了综合反映可燃物失水与吸水过程的 10h 时滞可燃物湿度模型。据比较, 该模型可准确地模拟 10h 时滞可燃物的湿度变化 ( $R^2 = 0.88, P < 0.01$ ), 可为精细化火险预报提供技术支持。

**关键词:** 10h 时滞可燃物湿度; 平衡含水率; 可燃物湿度模型

## Simulating 10-hour time-lag fuel moisture in Daxinganling

HU Tianyu<sup>1,3</sup>, ZHOU Guangsheng<sup>1,2,\*</sup>, JIA Bingrui<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Wildfire is a necessary disturbance for forest ecosystem's regeneration and succession, but frequent and large fires threaten human life and activities. Forecasting forest fires is a useful method for fire disaster prevention and emergency operation. The accurate simulation of moisture content of dead fuels is critical for forest fire danger forecast because it's strongly related to the ignition and fire spread. Daxinganling provides many forestry productions to China but it was also one of the highly fire-prone areas in China. Developing an accurate model for estimating hour scale dead fuel moisture content in the Daxinganling is very necessary and important. A fire remote automatic weather station was settled in Huzhong National Nature Reserve which is located in the Daxinganling larch forest to collect 10-hour time-lag fuel moisture content and meteorological factors (temperature, relative humidity and wind speed). The record frequency is half-hour per time. In this research, Fosberg model and Van Wagner model were evaluated, since they were widely used in forest fire danger forecast system and based on the equilibrium moisture content (EMC) that is easy to use. Desorption and absorption processes are the key to simulate fuel moisture content. So, this research chooses continuous observation data during August 25—28, 2010 without any precipitation to validate these two processes. The results show that both Fosberg model and Van Wagner model can simulate when desorption or absorption process begins, but all of them could not simulate well for whole process independently. Fosberg model could give better simulation at desorption stage ( $R^2 = 0.96, P < 0.01$ ), and Van Wagner

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706021); 国家重点基础研究发展计划(2010CB951303)共同资助

收稿日期: 2011-10-14; 修订日期: 2012-04-24

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn



model does better at absorption stage ( $R^2=0.83$ ,  $P<0.01$ ). Through analysis the potential actual variation of fuel moisture content in the desorption and absorption process, the vapour exchange coefficient is nearly to be a constant in the desorption which is coincide with Fosberg model's and the absorption's the vapour exchange coefficient seem to be variable which is similar to the Van Wagner model's. Thus, a new hour scale fuel moisture model is developed considering the difference of desorption and absorption processes: the desorption process based on Fosberg model with the Simard's EMC model and the absorption process based on Van Wagner model with the Van Wagner's EMC model. The new model use the difference between fuel moisture content and Van Wagner's absorption EMC to determine the vapor exchange process, and it could give better simulation ( $R^2=0.77$ ,  $P<0.01$ ). But the absorption processes was underestimated in the calm weather, and the modified model simulated better ( $R^2=0.88$ ,  $P<0.01$ ). This research could provide the technical supports for the forest fire danger forecast in Daxinganling.

**Key Words:** 10-hour time-lag fuel moisture; equilibrium moisture content; fuel moisture model

林火作为森林生态系统的重要干扰因子,是森林演替更新不可缺少的重要因素,但近年来频发的林火已经严重地影响了人类的生产生活。为此,迫切需要开展林火的准确预测预报,以更好地服务于森林的经营管理和灾害防治。

通常,林火发生需要 3 个条件:天气、火源和可燃物。其中,可燃物湿度作为可燃物与气象因素的综合表现,包含了大量林火发生的信息。因此,准确模拟可燃物湿度的变化过程是火险预报的关键。

美国国家火险等级系统根据不同可燃物的失水速率差异,将死可燃物划分为 1、10、100、1000h 时滞<sup>[1]</sup>, 10h 时滞的可燃物对应了直径 0.64—2.5 cm 范围内的枝条。时滞的含义是在温度为 27 °C 和相对湿度为 20% 的条件下,可燃物失去初始含水量和平衡含水率差值的  $1-e^{-1}$  (63%) 所需要的时间。其中,1h 和 10h 时滞可燃物主要决定了林火的蔓延速度,虽然 1h 时滞可燃物在引燃和蔓延起着重要的作用,但是 10h 时滞可燃物湿度还用来估算 1h 时滞可燃物湿度,同时 10h 时滞可燃物对林火的蔓延和能量估算有着重要的作用。因此,准确估算 10h 时滞可燃物是确保火险预报准确性的关键。

20 世纪以来,国内外科学家发展了一系列可燃物湿度模拟模型<sup>[2-12]</sup>,并被用于火险预报系统和火行为模型<sup>[13-14]</sup>。随着森林防火需求的日益精细化,小时尺度的可燃物湿度模拟越来越受到重视。

可燃物湿度在空气中的变化主要由两个过程组成:失水过程和吸水过程。准确判断和模拟这两个过程决定了可燃物湿度的模拟效果。Fosberg<sup>[5]</sup>和 Van Wagner<sup>[6]</sup>分别建立了小时尺度和天尺度的可燃物湿度模型,天尺度的可燃物湿度模型重点关注一天中最易发生林火的时间(当地时间 14:00 左右)的可燃物湿度,并被分别用于美国国家火险等级系统和加拿大火险等级系统。国内学者关于可燃物湿度模拟研究主要集中在日尺度<sup>[15-19]</sup>,但是这些研究都基于简单的回归方程。Weise 等<sup>[20]</sup>在夏威夷验证了 Fosberg 模型对 1h 时滞可燃物湿度的模拟效果,Carlson 等<sup>[21]</sup>利用俄克拉何马州的 1、10、100、1000h 时滞可燃物湿度观测资料验证了 Fosberg 模型的模拟效果(时间尺度为 15min 和 1h),但是验证数据只有早上和中午两个时间点的数据,不能完全代表 Fosberg 模型对小时尺度的模拟效果。关于 Van Wagner 模型的验证研究仍未见报道。由于缺乏野外观测资料,在小时尺度上关于这两个模型对失水和吸水过程的验证还很少,制约着可燃物湿度的准确模拟,影响着森林火险的准确预测预报。

本研究试图利用中国东北地区大兴安岭林区 10h 时滞可燃物湿度的半小时动态观测资料及其相关气象要素资料,从可燃物的失水和吸水过程对目前广泛使用的 Fosberg 模型和 Van Wagner 模型进行评估,分析可燃物的失水与吸水过程控制机制,进而建立可综合反映可燃物失水与吸水过程的 10h 时滞可燃物湿度模型,服务于林火的预测预报。

## 1 研究资料与方法

### 1.1 资料来源

我国东北地区的大兴安岭林区是我国林火高危区域。本研究地点选在中国北方森林生态系统定位研

究站。该站位于黑龙江大兴安岭呼中自然保护区,即我国最大的寒温带针叶林生态系统自然保护区(123°01′04″ E, 51° 46′52″ N, 海拔 773 m)。该区属大陆性季风气候,年均气温 4.7℃,年际平均气温变动在 2.1—5.3℃。地貌类型为大兴安岭北部石质中低山山地,地势平缓,坡度在 15°以下。棕色针叶林土是该区最具有代表性的土壤类型。地带性植被类型为寒温性针叶林,以兴安落叶松(*Larix gmelinii*)为单优势树种,并混有少量白桦(*Betula platyphylla*)和樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*),林下灌木主要有杜香(*Ledum palustre*)、越桔(*Vaccinium vitis-idaea*)、兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)和东北赤杨(*Alnus mandshurica*)等,草本主要有小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)和苔草(*Carex appendiculata*)等。

在研究站固定样地安装有 RAWS-F 远程自动防火气象站,观测内容包括 2 m 空气温度、2 m 空气湿度、降雨量、风向、风速和 10h 时滞可燃物湿度,观测频率为半小时 1 次。观测时间从 2010 年 6 月 29 日至 2010 年 9 月 17 日,其中可燃物湿度和降雨量都有 3 个重复观测。10h 时滞可燃物含水量利用 CS505 可燃物含水量传感器来观测;CS505 可燃物含水量传感器通过使用时域反射技术(TDR)观测西黄松樺钉(材料西黄松;直径 1.3 cm;长度 21.3 cm;重量 45 g)的含水量,得到的观测值代表 10h 时滞可燃物的含水量。

## 1.2 模拟模型

Fosberg 模型和 Van Wagner 模型均是以平衡含水率为基础发展起来的。平衡含水率(EMC)指可燃物在某一环境条件下最终达到水汽交换平衡时的湿度大小。平衡含水率一般是相对湿度和温度的函数<sup>[22]</sup>。基于平衡含水率的可燃物湿度模型可表示如下:

$$FM_n = FM_{n-1} + D(EMC_n - FM_{n-1}) \quad (1)$$

式中, $FM_n$  是  $n$  时刻的可燃物湿度; $FM_{n-1}$  是  $n-1$  时刻的可燃物湿度; $D$  是扩散系数; $EMC_n$  是  $n$  时刻的平衡含水率。Fosberg<sup>[5]</sup>提出了基于扩散原理的可燃物湿度估算方法:

$$FM_n = FM_{n-1} + (EMC_n - FM_{n-1})(1 - \zeta e^{-\lambda t}) \quad (2)$$

式中, $\lambda$  为可燃物时滞的倒数; $\zeta$  为可燃物相似系数; $t$  为水汽交换过程的持续时间。

Van Wagner<sup>[6]</sup>发展的可燃物湿度模型为:

$$FM_n = EMC_n + (FM_{n-1} - EMC_n)e^{-k_\alpha t} \quad (3)$$

$$k_\alpha = (0.0565(1 - \eta^{1.7}) + 0.0176u^{0.5}(1 - \eta^8))e^{0.0365T} \quad (4)$$

式中,参数  $\eta$  在可燃物处于失水过程时为  $H/100$ ,在吸水过程时为  $(1-H/100)$ , $T$  为温度(℃), $H$  为相对湿度(%)。Van Wagner<sup>[14]</sup>认为,在某一环境条件下,可燃物失水达到平衡含水率时的湿度会略不同于在可燃物吸水达到平衡含水率时的湿度,差异约为 2%。因此, Van Wagner 模型的平衡含水率为失水平衡含水率和吸水平衡含水率;而 Fosberg 模型认为可燃物湿度到达平衡时只有一个平衡含水率,并采用 Simard 的平衡含水率模型进行计算<sup>[23]</sup>。

## 1.3 可燃物湿度模拟

本研究可燃物湿度观测时间(6 月 29 日至 9 月 17 日)为大兴安岭林区的生长期,森林郁闭度高、林下受太阳辐射影响较少。模型的空气温度与湿度为 2 m 处的空气温度和湿度。可燃物湿度的变化主要受降雨和空气温湿度影响,本研究的目的主要是研究由空气温湿度引起的可燃物湿度变化。为避免降雨对可燃物湿度的影响,特选取观测时段内连续 4d 无降雨(2010 年 8 月 25 日—2010 年 8 月 28 日)的气象数据为模型输入数据,并根据观测数据中可燃物的湿度变化将这 4d 无降雨数据按失水过程和吸水过程分别验证模型的模拟效果。

## 2 研究结果

### 2.1 气象条件

观测时段内连续 4d 无降雨的验证期内,气象条件较为一致(图 1, X 轴以 2010 年 8 月 25 日 00:00 为起点,观测间隔为半小时总共 192 个观测值)。空气平均温度呈弱上升趋势,昼夜温差大,白天最高气温为 25℃,夜间最低气温为 0℃;相对湿度夜间为 95% 左右,白天在 30% 左右;白天有微风,夜间到凌晨几乎无风。

可燃物的失水过程一般发生在白天,而吸水过程从傍晚持续到清晨。

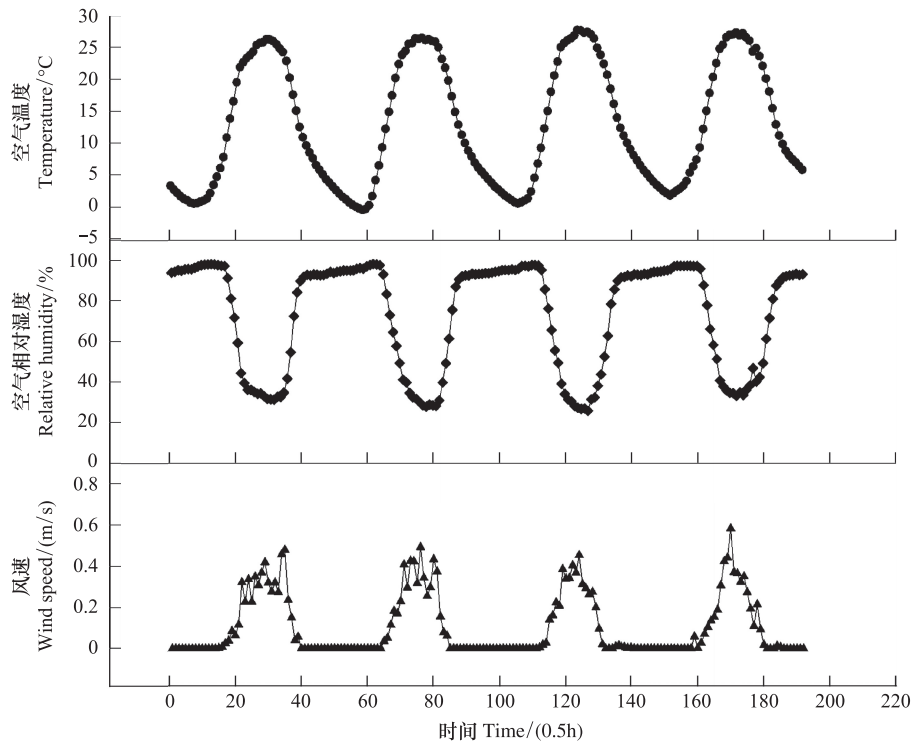


图1 2010 年观测时段内连续 4d 无降雨验证期的气象条件

Fig.1 Meteorological conditions of four continuous free rainfall days during the observation in 2010

## 2.2 10h 时滞可燃物湿度的水汽交换过程模拟

Fosberg 模型和 Van Wagner 模型对 10h 时滞可燃物失水过程和吸水过程的模拟效果不同。Fosberg 模型能够很好地模拟 10h 时滞可燃物在失水过程中的湿度变化 ( $R^2=0.96, P<0.01$ ), 但过高地估计了吸水过程中 10h 时滞的可燃物湿度 ( $R^2=0.64, P<0.01$ ); Van Wagner 模型对吸水过程中 10h 时滞的可燃物湿度的模拟效果 ( $R^2=0.83, P<0.01$ ) 优于 Fosberg 模型, 但对失水过程中 10h 时滞可燃物湿度的模拟效果 ( $R^2=0.60, P<0.01$ ) 不如 Fosberg 模型。因此, 这两个模型均不能很好地模拟无降雨条件下 10h 时滞的可燃物湿度 (图 2—图 3), 但两个模型均对吸水过程和失水过程的切换点模拟较好 (图 3)。

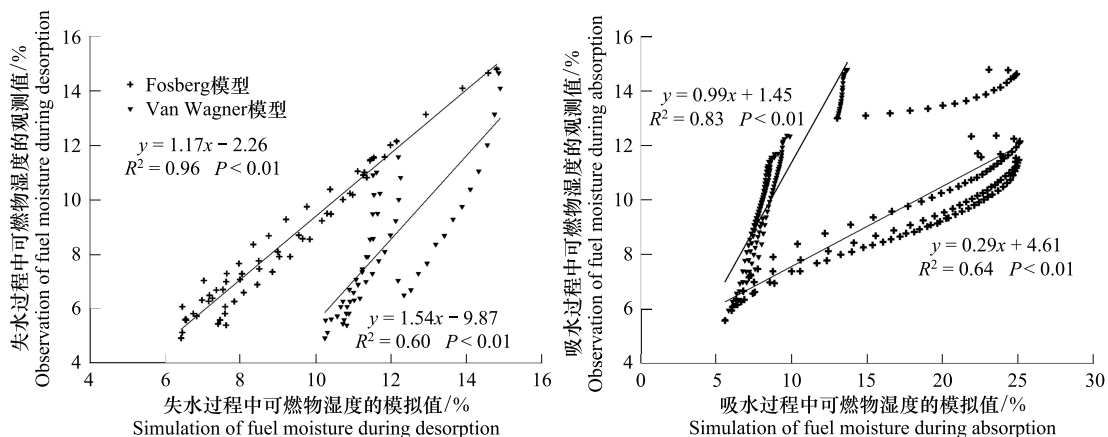


图2 Fosberg 模型和 Van Wagner 模型对 10h 时滞可燃物湿度的模拟

Fig.2 Simulation of 10hr time-lag fuel moisture using Fosberg model and Van Wagner model

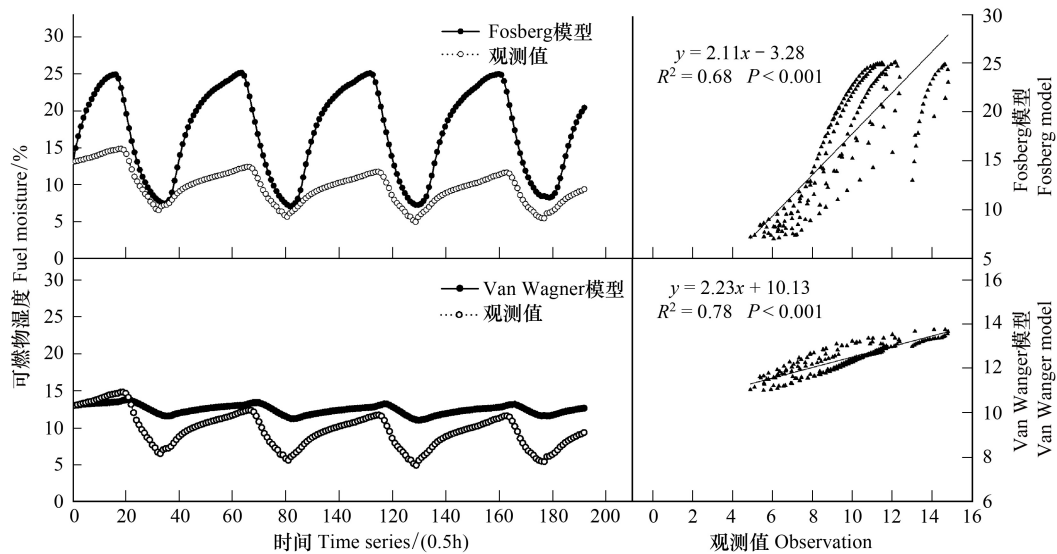


图3 2010年8月25—28日10h时滞可燃物湿度的模拟

Fig. 3 Simulation of fuel moisture during 25–28 August 2010

### 3 分析与讨论

#### 3.1 吸水和失水过程中的水汽交换速率

可燃物湿度变化包括两个过程:失水过程和吸水过程。准确判断和模拟这两个过程是准确模拟可燃物湿度的关键。基于平衡含水率的可燃物湿度模型通过当前可燃物湿度与平衡含水率之间的差值确定失水过程和吸水过程。当可燃物湿度大于平衡含水率时,可燃物中的水分向外部扩散,即失水过程;反之,可燃物从空气中吸收水分,即吸水过程。Fosberg模型和Van Wagner模型都能较好地判断吸水过程和失水过程的起始和终止(图3),表明平衡含水率理论能够很好地用于模拟可燃物湿度。因此,Fosberg模型和Van Wagner模型对10h时滞可燃物湿度的模拟不准确主要是对吸水过程和失水过程中的水汽交换描述不准确造成。

由式(2)可见, $\zeta$ 和 $\lambda$ 都是与可燃物相关的参数,与外界气象因子无关。所以,Fosberg模型的吸水过程和失水过程具有相同的水汽交换系数( $D$ ),即实际变化量/潜在变化量是一个定值,并且该系数只与可燃物性质有关,与外界气象因子无关。由式(4)可见, $k$ 是一个与气象因子相关的函数。Van Wagner模型描述的吸水过程和失水过程除具有不同的平衡含水率外,在失水过程和吸水过程中采用的水汽交换系数也不相同,且水汽交换系数( $D$ )受当前环境中的空气温度、湿度及风速的影响。尽管如此,从模拟结果看(图3),Van Wagner模型仍不能很好地模拟可燃物湿度的变化。由式(1)可知,水汽交换过程中的交换系数( $D$ )可用 $FM_n - FM_{n-1} / (EMC_n - FM_{n-1})$ 表示,式中只有 $EMC$ 是非观测量。因此,可以近似地将由此得到的水汽交换系数作为真值。由图4可见,水汽交换系数在整个湿度变化过程中并不是一个定值,在失水过程中的水汽交换系数可近似看做一个定值,而在吸水过程中水汽交换系数却不是一个定值。因此,准确地模拟可燃物的湿度变化需要将可燃物的吸水过程和失水过程分开描述。

决定可燃物失水过程与吸水过程中水汽交换速率不一致的因素是什么呢?分析失水过程和吸水过程中可燃物与空气间的水汽交换过程和可燃物的环境条件发现,水汽交换过程和环境的差异是导致水汽交换速率不一致的主要原因。当可燃物处于失水过程时,水分子从可燃物内部逐步往外扩散,可燃物内部的水汽传递是限制水分子扩散的主要因素,但是水分子向外扩散的过程并不受影响;在吸水过程中,由于可燃物内部水汽传递较慢,导致可燃物表面的湿度较高,与外界的水汽浓度差减小,因此可燃物表面吸收水分的速率降低,导致可燃物失水过程与吸水过程的水汽交换速率不同。同时,分子扩散运动还受温度影响,温度越高,分子扩散速度越快。可燃物发生失水过程时都在9:00到17:00,这段时间温度较高,可燃物中的水汽扩散速率较高,而吸水过程通常发生在傍晚至清晨,这段时间内的温度都较低,可燃物中的水汽扩散速率较低。



### 3.2 可燃物湿度模拟的优化

综上所述,准确地模拟可燃物的湿度变化需要分别对可燃物的吸水过程和失水过程进行模拟。根据 Fosberg 模型和 Van Wagner 模型对失水过程和吸水过程中水汽变化描述的优势,采用 Fosberg 模型模拟失水过程的可燃物湿度变化,采用 Van Wagner 模型模拟吸水过程中的可燃物湿度变化,同时利用 Van Wagner 模型中平衡含水率与当前可燃物湿度之差来判断失水过程和吸水过程,采用两个模型模拟时所用的平衡含水率。结果表明,该模型能够显著地提高可燃物湿度模拟的准确性( $R^2=0.77$ ),但仍低估了吸水过程中的可燃物湿度(图 5),这种低估通常发生在 20:00 点以后,此时空气的相对湿度几乎保持在 95% 左右(图 1)且为静风。Van Wagner<sup>[6]</sup>指出,如果风速数据缺失可按照白天

10—12 km/h 和晚上 4—6 km/h 的风速作为输入,或者采用 Van Wagner<sup>[6]</sup>给出的每天风速趋势作为输入,进行可燃物湿度的模拟。然而,该研究时段为静风,如果按照 Van Wagner<sup>[6]</sup>给出的弥补方法进行可燃物湿度模拟,则风速均大于零。虽然 Van Wagner<sup>[6]</sup>认为除降雨后的一段时间外,风速对可燃物湿度的影响不大,但在风速数据缺失后仍按一定的风速来处理,表明如果风速为零将造成模拟可燃物湿度的低估。

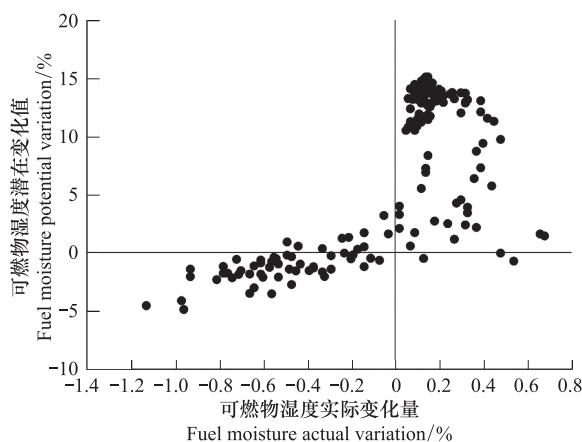


图 4 可燃物湿度实际变化量与潜在变化量的关系

Fig. 4 Relationship between actual and potential variation of fuel moisture

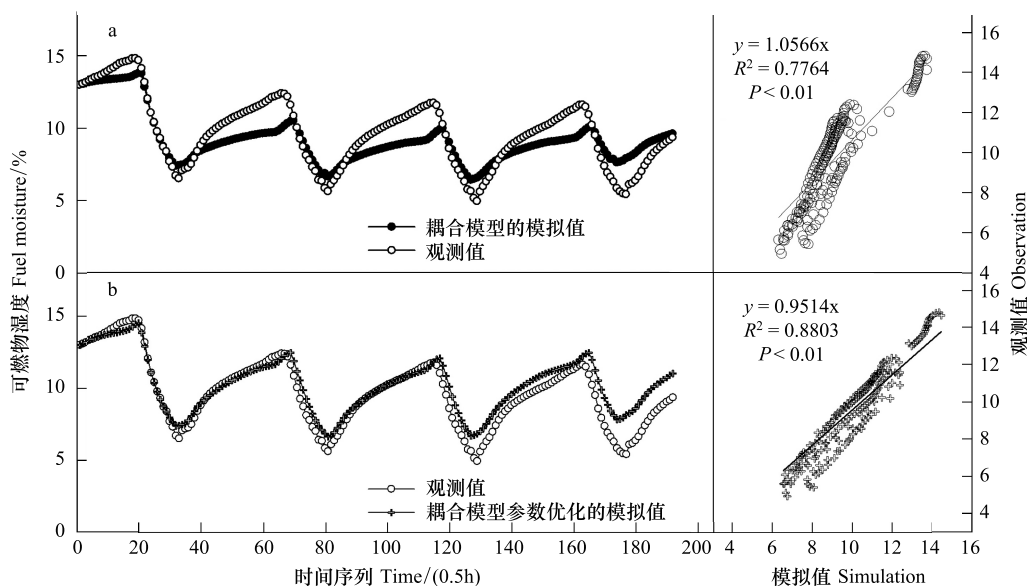


图 5 所建模型对 2010 年 8 月 25—28 日 10h 时滞可燃物湿度的模拟

Fig. 5 Simulation of fuel moisture during 25—28, August 2010 using the modified model

为反映风速变化对可燃物湿度的影响,分析两个模型的  $K\alpha$  发现,当风速为 0 时,由气象因子估算的  $K\alpha$  低于由观测值反算得到的  $K\alpha$ , 低估达 30%—40%。分析估算公式发现,当风速为 0 时,式(4)的  $0.0176u^{0.5}(1-\eta^8)e^{0.0365T}$  为 0。因此, Van Wagner 模型没有很好地模拟可燃物在静风条件下的水汽交换。 $0.0176u^{0.5}(1-\eta^8)e^{0.0365T}$  应该  $0.0176(a+u^{0.5})(1-\eta^8)e^{0.0365T}$ , 修改后的模型能很好地解释静风和有风对可燃物湿度的影响。为此,引入  $(K_{a1}-K_{a2})/(0.0176(1-\eta^8)e^{0.0365T})$  来反映静风影响。分析表明,  $a$  在 0.197—6.23, 在此取其集合的平均值  $1.62\pm 0.13$ 。据此,式(4)可改写为:

$$K_{\alpha} = (0.0565(1-\eta^{1.7}) + 0.0176(1.62+u^{0.5})(1-\eta^8))e^{0.0365T} \quad (5)$$



采用优化参数模型能够更好地模拟可燃物湿度的变化( $R^2=0.88$ ),在一定程度上降低了耦合模型的低估,为可燃物湿度模拟提供更好的支持。

#### 4 结论

可燃物湿度是森林火险预报和火行为预测的重要输入因子之一,准确模拟小时尺度的可燃物湿度是精细化防火预报预测的要求。本研究利用中国大兴安岭呼中保护区收集的气象数据和可燃物湿度数据,从可燃物湿度变化的失水和吸水过程评估了半小时尺度的 Fosberg 模型和 Van Wagner 模型的模拟效果,发现两个模型均不能独立地很好地在半小时尺度上模拟可燃物湿度的变化。在此基础上,通过耦合两个模型的失水和吸水过程,通过考虑可燃物在静风条件下的水汽交换优化 Van Wagner 模型参数,建立了一个新的可燃物湿度模型。结果表明,该模型能够更好地模拟可燃物湿度的变化,可为精细化的火险预报模型提供参考。

#### References:

- [1] Bradshaw L S, Deeming J E, Burgan R E, Cohen J D. The 1978 National Fire-Danger Rating System. Technical Documentation, 1983.
- [2] McArthur A G. Control Burning in Eucalypt Forests. Commonwealth of Australia, Forestry and Timber Bureau, 1962.
- [3] McArthur A G. Weather and Grassland Fire Behaviour. Forestry and Timber Bureau, Department of national Development, Commonwealth of Australia, 1966.
- [4] McArthur A. Fire Behaviour in Eucalypt Forests. Canberra: Forestry and Timber Bureau, 1967.
- [5] Fosberg M A, Deeming J E, Forest R M, Service U S F. Derivation of the 1-and 10-Hour Timelag Fuel Moisture Calculations for Fire-Danger Rating. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture, 1971.
- [6] Van Wagner C E. A Method of Computing Fine Fuel Moisture Content Throughout the Diurnal Cycle. Petawawa Forest Experiment Station, 1977.
- [7] Sneeuwjagt R J, Peet G, Beggs B, Australia W. Forest Fire Behaviour Tables for Western Australia. Forests Department, Western Australia, 1979.
- [8] Rothermel R C. How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Fange Fires. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1983.
- [9] Rothermel R C, Wilson R, Morris G A, Sackett S S. Modeling Moisture Content of Fine Dead Wildland Fuels. USDA Forest Service Research Paper. INT-359. Ogden. Utah, 1986.
- [10] Péché G. A model to predict the moisture content of reindeer lichen. Forest Science, 1989, 35(4): 1014-1028.
- [11] Nelson R M Jr. Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30(7): 1071-1087.
- [12] Matthews S. A process-based model of fine fuel moisture. International Journal of Wildland Fire, 2006, 15(2): 155-168.
- [13] Deeming J E, Burgan R E, Cohen J d. The National Fire Danger Rating System~C1978. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. General Technical Report INT-39. (Ogden, UT), 1977.
- [14] Van Wagner C E, Service C F. Development and Structure of the Canadian Forest fire Weather Index System. Canadian Forestry Service, 1987.
- [15] He Z Q, Li C S, Zhang C G, Ma L H, Yu L, Duan X G. Research of forest fuel moisture model. Forest Fire Prevention, 1995, (2): 15-16, 20-20.
- [16] Ju E D, Chen G R, Wang R J. Studies on the relationship between fuel moisture and meteorological factors. Forest Fire Prevention, 1993, (1): 17-21.
- [17] Wang D X, Xu Z, Zhang D Q, Zhu D L. Relationships between Climatic factors and water content of fine fuels. Journal of Northwest Forestry University, 1996, 11(1): 35-39.
- [18] Ma L H, Li Z S. On the six forest active combustible plants moisture model in daxingan mountains. Journal of Jilin Forestry University, 1998, 14(1): 21-23.
- [19] Luo Y Z, Che K J, Jiang Z R. Change pattern of forest fuel moisture in the Qilian Mountains. Journal of Gansu Agricultural University, 2005, 40(2): 239-244.
- [20] Weise D R, Fujioka F M, Nelson R M Jr. A comparison of three models of 1-h time lag fuel moisture in Hawaii. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 133(1/4): 28-39.
- [21] Carlson J D, Bradshaw L S, Nelson R M, Bensch R R, Jabrzemski R. Application of the Nelson model to four timelag fuel classes using Oklahoma field observations: model evaluation and comparison with National Fire Danger Rating System algorithms. International Journal of Wildland Fire, 2007, 16(2): 204-216.
- [22] Viney N R. A review of fine fuel moisture modelling. International Journal of Wildland Fire, 1991, 1(4): 215-234.
- [23] Simard A. The Moisture Content of Forest Fuels-1. A Review of the Basic Concepts. Canadian Department of Forest and Rural Development, Forest Fire Research Institute. Information Report FF-X-14, 1968.

#### 参考文献:

- [15] 何忠秋, 李长胜, 张成钢, 马丽华, 于力, 段向阁. 森林可燃物含水量模型的研究. 森林防火, 1995, (2): 15-16, 20-20.
- [16] 居恩德, 陈贵荣, 王瑞君. 可燃物含水率与气象要素相关性的研究. 森林防火, 1993, (1): 17-21.
- [17] 王得祥, 徐钊, 张景群, 朱德兰. 细小可燃物含水率与气象因子关系的研究. 西北林学院学报, 1996, 11(1): 35-39.
- [18] 马丽华, 李兆山. 大兴安岭 6 种活森林可燃物含水率的测试与研究. 吉林林学院学报, 1998, 14(1): 21-23.
- [19] 罗永忠, 车克钧, 蒋志荣. 祁连山林区森林可燃物含水率变化规律研究. 甘肃农业大学学报, 2005, 40(2): 239-244.

CONTENTS

The combined effects of elevated CO <sub>2</sub> and elevated temperature on proliferation of cyanophage PP .....	NIU Xiaoying, CHENG Kai, RONG Qianqian, et al (6917)
Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956—2009 .....	CHEN Jun, WANG Yuhui (6925)
Emergy and economic evaluations of two sewage treatment systems .....	LI Min, ZHANG Xiaohong, LI Yuanwei, et al (6936)
Individual spatial pattern and spatial association of <i>Stipa krylovii</i> population in Alpine Degraded Grassland .....	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6946)
Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for <i>Phyllostachys praecox</i> over soil-surface mulching .....	LIU Yadi, FAN Shaohui, CAI Chunju, et al (6955)
Characteristics of leaf element concentrations of twelve nutrients in <i>Acacia confusa</i> and <i>Leucaena glauca</i> in secondary forests of acid rain region in Fuzhou .....	HAO Xinghua, HONG Wei, WU Chengzhen, et al (6964)
Relationships between main insect pests and their predatory natural enemies in “Yuhualu” juicy peach orchard .....	KE Lei, SHI Xiaoli, ZOU Yunding, et al (6972)
Simulating 10-hour time-lag fuel moisture in Daxinganling .....	HU Tianyu, ZHOU Guangsheng, JIA Bingrui (6984)
Soil nutrient characteristics under different vegetations in the windy and sandy region of northern Shaanxi .....	LI Wenbin, LI Xinpeng (6991)
Partitioning of autotrophic and heterotrophic soil respiration in southern type poplar plantations .....	TANG Luozhong, GE Xiaomin, WU Lin, et al (7000)
Soil water and salinity in response to water deliveries and the relationship with plant growth at the lower reaches of Heihe River, Northwestern China .....	YU Tengfei, FENG Qi, LIU Wei, et al (7009)
Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag .....	MEI Tingting, ZHAO Ping, NI Guangyan, et al (7018)
Invasion of exotic <i>Ageratina adenophora</i> Sprengel. alters soil physical and chemical characteristics and arbuscular mycorrhizal fungus community .....	YU Wenqing, LIU Wanxue, GUI Furong, et al (7027)
Models and methods for information extraction of complex ground objects based on LandSat TM images of Hainan Island, China .....	WANG Shudong, ZHANG Lifu, CHEN Xiaoping, et al (7036)
Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine <i>Abies faxoniana</i> forest of western Sichuan .....	YANG Yulian, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (7045)
Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice .....	WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al (7053)
Growth characteristics, lignin degradation enzyme and genetic diversity of <i>Fomes fomentarius</i> by SRAP marker among populations .....	CAO Yu, XU Ye, WANG Qiuyu (7061)
Effects of the invasion by <i>Solidago canadensis</i> L. on the community structure of soil animals .....	CHEN Wen, LI Tao, ZHENG Rongquan, et al (7072)
Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils .....	ZHANG Xiangqian, HUANG Guoqin, BIAN Xinmin, et al (7082)
Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms .....	ZHANG Yuting, ZHU Min, XIAN Yanxiangwa, et al (7091)
The stable nitrogen isotope of size-fractionated plankton and its relationship with biomass during winter in Daya Bay .....	KE Zhixin, HUNG Liangmin, XU Jun, et al (7102)
Dynamics of toxic and non-toxic <i>Microcystis</i> spp. during bloom in the large shallow hypereutrophic Lake Taihu .....	LI Daming, YE Linlin, YU Yang, et al (7109)
Activities of antioxidant enzymes and Zn-MT-like proteins induced in <i>Chlorella vulgaris</i> exposed to Zn <sup>2+</sup> .....	YANG Hong, HUANG Zhiyong (7117)
Ecological footprint in fujian based on calculation methodology for the national footprint accounts .....	QIU Shoufeng, ZHU Yuan (7124)
The comparison of CO <sub>2</sub> emission accounting methods for energy use and mitigation strategy: a case study of China .....	YANG Xiai, CUI Shenghui, LIN Jianyi, et al (7135)
Ecological damage assessment of jiaozhou bay reclamation based on habitat equivalency analysis .....	LI Jingmei, LIU Tieying (7146)
The value assessment of county-level ecological assets: a case in Fengning County, Hebei Province .....	WANG Hongyan, GAO Zhihai, LI Zengyuan, et al (7156)
<b>Review and Monograph</b>	
Molecular basis for enhancement of plant drought tolerance by arbuscular mycorrhizal symbiosis: a mini-review .....	LI Tao, DU Juan, HAO Zhipeng, et al (7169)
A review of carbon cycling and sequestration in urban soils .....	LUO Shanghua, MAO Qizheng, MA Keming, et al (7177)
overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing .....	DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang (7190)
Research progress on influencing of light attenuation and the associated environmental factors on the growth of submersed aquatic vegetation .....	WU Mingli, LI Xuyong (7202)
The framework of stoichiometry homeostasis in zooplankton elemental composition .....	SU Qiang (7213)
<b>Scientific Note</b>	
Abundance and biomass of planktonic ciliates in the sea area around Zhangzi Island, Northern Yellow Sea in July and August 2010 .....	YU Ying, ZHANG Wuchang, ZHANG Guangtao, et al (7220)
Research of wildlife resources sustainable development based on entropy method in China .....	YANG Xitao, ZHOU Xuehong, ZHANG Wei (7230)
Influence of residue composition and addition frequencies on carbon mineralization and microbial biomass in the soils of agroforestry systems .....	WANG Yikun, FANG Shengzuo, TIAN Ye, et al (7239)
Seasonal changes in microbial diversity in different cells of a wetland system constructed for municipal sewage treatment .....	CHEN Yonghua, WU Xiaofu, ZHANG Zhenni, et al (7247)

# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,300 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

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 32 卷 第 22 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 22 (November, 2012)

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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:1000717	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

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元