

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

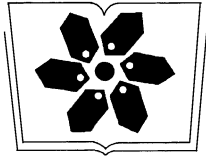
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第2期 Vol.34 No.2 **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 2 期 2014 年 1 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 连续免耕对不同质地稻田土壤理化性质的影响 龚冬琴, 吕 军 (239)
- 下辽河平原景观格局脆弱性及空间关联格局 孙才志, 闫晓露, 钟敬秋 (247)
- 完全水淹环境中光照和溶氧对喜旱莲子草表型可塑性的影响 许建平, 张小萍, 曾 波, 等 (258)
- 赤潮过程中“藻-菌”关系研究进展 周 进, 陈国福, 朱小山, 等 (269)
- 盐湖微微型浮游植物多样性研究进展 王家利, 王 芳 (282)
- 臭氧胁迫对植物主要生理功能的影响 列淦文, 叶龙华, 薛 立 (294)
- 啮齿动物分子系统地理学研究进展 刘 铸, 徐艳春, 戎 可, 等 (307)
- 生态系统服务制图研究进展 张立伟, 傅伯杰 (316)

个体与基础生态

- NaCl 胁迫下沙枣幼苗生长和阳离子吸收、运输与分配特性 刘正祥, 张华新, 杨秀艳, 等 (326)
- 不同生境吉首蒲儿根叶片形态和叶绿素荧光特征的比较 向 芬, 周 强, 田向荣, 等 (337)
- 小麦 LAI-2000 观测值对辐亮度变化的响应 王 龔, 田庆久, 孙绍杰, 等 (345)
- K^+ 、 Cr^{6+} 对网纹藤壶幼虫发育和存活的影响 胡煜峰, 严 涛, 曹文浩, 等 (353)
- 马铃薯甲虫成虫田间扩散规律 李 超, 彭 赫, 程登发, 等 (359)

种群、群落和生态系统

- 莱州湾及黄河口水域鱼类群落结构的季节变化 孙鹏飞, 单秀娟, 吴 强, 等 (367)
- 黄海中南部不同断面鱼类群落结构及其多样性 单秀娟, 陈云龙, 戴芳群, 等 (377)
- 苏南地区湖泊群的富营养化状态比较及指标阈值判定分析 陈小华, 李小平, 王菲菲, 等 (390)
- 盐城淤泥质潮滩湿地潮沟发育及其对米草扩张的影响 侯明行, 刘红玉, 张华兵 (400)
- 江苏省农作物最大光能利用率时空特征及影响因子 康婷婷, 高 苹, 居为民, 等 (410)
- 1961—2010 年潜在干旱对我国夏玉米产量影响的模拟分析 曹 阳, 杨 婕, 熊 伟, 等 (421)
- 黑龙江省 20 世纪森林变化及对氧气释放量的影响 张丽娟, 姜春艳, 马 骏, 等 (430)
- 松嫩草原不同演替阶段大型土壤动物功能类群特征 李晓强, 殷秀琴, 孙立娜 (442)
- 小兴安岭 6 种森林类型土壤微生物量的季节变化特征 刘 纯, 刘延坤, 金光泽 (451)

景观、区域和全球生态

- 黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应 徐建文, 居 辉, 刘 勤, 等 (460)

我国西南地区风速变化及其影响因素 张志斌,杨 莹,张小平,等 (471)

青海湖流域矮嵩草草甸土壤有机碳密度分布特征 曹生奎,陈克龙,曹广超,等 (482)

基于生命周期评价的上海市水稻生产的碳足迹 曹黎明,李茂柏,王新其,等 (491)

研究简报

荒漠草原区柠条固沙人工林地表草本植被季节变化特征 刘任涛,柴永青,徐 坤,等 (500)

跨地带土壤置换实验研究 靳英华,许嘉巍,秦丽杰 (509)

SWAT 模型对景观格局变化的敏感性分析——以丹江口库区老灌河流域为例
..... 魏 冲,宋 轩,陈 杰 (517)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 288 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 29 * 2014-01



封面图说：高原盐湖——中国是世界上盐湖分布比较稠密的国家,主要分布在高寒的青藏高原以及干旱半干旱地区的新疆、内蒙古一带。尽管盐湖生态环境极端恶劣,但它们依然是陆地特别是高原生态系统中十分重要的组成部分。微微型浮游植物通常是指粒径在 0.2—3 μm 之间的光合自养型浮游生物。微微型浮游植物不仅是海洋生态系统中生物量和生产力的最重要贡献者,也是盐湖生态系统最重要的组成部分。研究显示,水体矿化度是影响微微型浮游植物平面分布及群落结构组成的重要因子,光照、营养成分和温度等也会影响盐湖水体中微微型浮游植物平面分布及群落结构组成(详见 P282)。

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

DOI: 10.5846/stxb201304280861

张丽娟, 姜春艳, 马骏, 张安康, 姜蓝齐, 吴霜. 黑龙江省 20 世纪森林变化及对氧气释放量的影响. 生态学报, 2014, 34(2): 430-441.
Zhang L J, Jiang C Y, Ma J, Zhang A K, Jiang L Q, Wu S. Forest change and its impact on the quantity of oxygen release in Heilongjiang Province during the Past Century. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2): 430-441.

黑龙江省 20 世纪森林变化及对氧气释放量的影响

张丽娟*, 姜春艳, 马 骏, 张安康, 姜蓝齐, 吴 霜
(黑龙江省普通高等学校地理环境遥感监测重点实验室, 哈尔滨师范大学, 哈尔滨 150025)

摘要: 随着对大气环境质量研究的深入, 大气中氧气含量变化也引起了关注。森林是固碳释氧的重要生态系统, 黑龙江省近百年来, 森林面积减少了 37.163%, 估算由此导致的森林氧气释放量变化, 对研究大气氧气含量变化具有重要意义。以黑龙江省 1900 年、1949 年、1986 年和 2009 年为时间断面, 采用 C-FIX 模型及碳氧平衡方法, 模拟并分析了 20 世纪黑龙江省森林氧气释放量及其变化。结果表明: (1) 黑龙江省 20 世纪森林面积减少了 106667.570 km², 森林覆盖率减少了 23.568%。除樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 林、针阔混交林面积有所增加外, 其它树种的森林面积均减少, 其中云冷杉 (*Picea asperata* and *Abies nephrolepis*) 林及红松 (*Pinus koraiensis*) 林面积减少超过 80%, 空间上以松嫩平原及三江平原减少最为显著; (2) 森林年氧气释放量百年来减少了 5621.560 万 t, 减少近三分之一, 其空间变化明显, 西南部森林氧气释放量由百年前的最高区域变为最低区域, 三江平原释放氧气的森林区域明显减少; (3) 百年来各行政区森林年氧气释放量除伊春微弱增加外, 其余均呈减少趋势。其中大庆市、齐齐哈尔市减少显著, 减少了 90% 以上; (4) 控制实验表明, 森林面积变化导致黑龙江省区域森林年氧气释放量减少了 50%。人类活动引起的森林面积减少, 是导致黑龙江省森林氧气释放量减少的主要因素。

关键词: 森林变化; 氧气释放量; 百年变化; 黑龙江省

Forest change and its impact on the quantity of oxygen release in Heilongjiang Province during the Past Century

ZHANG Lijuan*, JIANG Chunyan, MA Jun, ZHANG Ankang, JIANG Lanqi, WU Shuang
Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring of Geographic Environment, College of Heilongjiang Province, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

Abstract: Through recent extensive studies on air quality, researchers have paid more attention to changes in oxygen content in the atmosphere. Studies show atmospheric oxygen in the lower atmosphere has a slow diminishing trend. The forest ecosystem is an important source of carbon sequestration and oxygen release, so, oxygen content is directly impacted by the change of forest area. Therefore, it is essential to examine the deforestation process and evaluate its impact on the changes of oxygen content in the atmosphere. Heilongjiang Province is the area in China primarily focused on forest resources and coverage, however, during the past century approximately 37.163% of the forest area has been converted to other land uses. We selected Heilongjiang Province as the research area, as it provided greater significance to study the variation of oxygen content in the atmosphere due to the estimated change of oxygen release caused by deforestation. According to historical references and remote sensing image data, we rebuilt the forest spatial distribution of Heilongjiang Province in 1900, 1949, 1986 and 2009. Using the C-FIX Model and carbon-oxygen balance method, this research simulated and analyzed the quantity and changes of oxygen released by the forest ecosystem of Heilongjiang Province. Analyses of the results suggest four major conclusions. First, the forest area of Heilongjiang has decreased by 106667.570 km², or approximately 23.568%

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42171217); 国家自然科学基金重点资助项目 (41030743)

收稿日期: 2013-04-28; **修订日期:** 2013-12-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zlj19650205@163.com

during the last century (1900—2009). Except for *Pinussylvestris* var. *mongolica* forest and Coniferous and broad leaved mixed forest, the geographic areas of all other forest types have decreased, within which the areas of *Piceaasperata* and *Abiesnephrolepis* forest and *Pinuskoraiensis* forest have decreased by more than 80%.Spatially, significant forest loss can be found in the Songnen and Sanjiang Plains. Second, during the last century, the quantity of oxygen released has been reduced by 56.2156 million tons, or approximately one-third of that in 1900. The oxygen production in the Southwest was the highest in 1900, but became the area with the lowest production in 2009. Moreover, a significant decrease of forest oxygen production occurred in the Sanjiang Plain. Third, the quantity of oxygen released from almost all administrative regions of Heilongjiang presents a decreasing trend, with the exception of Yichun. Among these regions, the quantity of oxygen released has reduced more than 90% in Daqing City and Qiqihar City; over 50% in Jiamusi City, Suihua City, and Jixi City; over 25% in Shuangyashan City, Qitaihe City and Heihe City; less than 10% in Daxinganling Region and Mudanjiang City. Fourth, during the past century, the total amount of oxygen released by *Picea asperata* and *Abies nephrolepis* forest has reduced by 91.855%, 78.905% by *Pinuskoraiensis* forest, and by 25.043% and 23.936% by deciduous mixed forest and *Larixgmelini* forest, respectively. However, the total amounts of oxygen released by Coniferous and broad leaved mixed forest and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest increased by 20.356% and 48.209%, respectively. *Piceaasperata* and *Pinus koraiensis* forest released the most amount of oxygen per unit area; *Larixgmelini* forest and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest released less. Finally, the results of the control experiments suggest that forest oxygen production in Heilongjiang is only approximately half of the amount in 1900. Moreover, forest degradation due to human activities is one of the major factors that leads to the decrease of the quantity of oxygen released.

Key Words: forest change; quantity of oxygen release; centennial change; Heilongjiang Province

随着对大气环境质量研究的深入,大气中氧气含量变化也越来越受到关注。研究表明,越往前追溯,地球大气含氧量就越高,大多数科学家都认同史前大气平均含氧量在 30%至 35%之间,而目前只有 21%。在一些污染严重、人口密度较大的城市和工业园区,大气含氧量只有 15%甚至更低^[1-4]。测量数据表明,低层大气氧气含量水平正在以平均每年 2 mg/m³ 的速率缓慢减少^[5-6],北半球与南半球大气中的氧气不但逐年减少,而且会随季节变化^[7]。大气中含氧量低于 19.5%时,人就会产生缺氧症状,人类所有的慢性疼痛以及疾病均由细胞缺氧引起^[8-9]。

对于大气中氧气含量的研究,国内外学者除了通过测定化石气泡中的氧气含量^[10]、直接监测^[6-7]、及建立生物化学模型估算大气中氧气含量^[11-13]的方法外,运用碳平衡法,依据植物生产力估算区域氧气释放量,间接揭示大气氧气含量变化,此类研究在国内外也有较多报道^[14-19]。其研究方法可概括为两种:一是通过估算区域氧气消耗量,折算出区域氧气释放量^[20];二是通过估算区域内绿色植物生产的有机碳量,按有机碳与氧气的质量比,计算区域氧气释放量。比较而言,第一种方法主观性较强,所以运用

第二种方法的研究成果较多。所不同的是,有的学者依据植被初级生产力(GPP)^[21-22]推算,有的学者依据净初级生产力(NPP)^[23-25]推算。GPP 是植物通过光合作用生产的初始有机碳量,NPP 是考虑了植物自养呼吸后剩余的有机碳量。由于依据不同,估算出的氧气释放量差异较大。相比 GPP 和 NPP, NEP 是净初级生产力减去异养呼吸消耗的同化产物,是考虑了呼吸消耗后的净光合产量^[26-27],因此依据 NEP 估算得出的为氧气净释放量,更能准确指示区域大气中氧气含量的变化。而目前相关研究还较少,已有研究也很少结合遥感及 GIS 技术,分析区域绿色植被氧气释放量空间分布及变化特征。

绿色植被面积减少会导致氧气释放量减少^[1]。森林是陆地绿色生态系统的重要组成部分,具有固碳释氧的重要生态功能^[25],地球上 60%以上的氧气来自森林生态系统^[20]。黑龙江省是中国森林资源最丰富的省份,森林面积约占全国森林总面积的 1/7。其广袤的森林是氧气生产源,二氧化碳汇,对调节区域生态环境起着重要作用。但 20 世纪百年间,由于人类活动影响,黑龙江省森林面积减少了 37.163%,森林面积减少所引起的区域氧气释放量

变化,此类研究还未见报道。

本文以 1900 年、1949 年、1986 年和 2009 年黑龙江省森林覆盖信息为依据,采用 C-FIX 模型模拟森林净生态系统生产力(NEP),基于碳氧平衡原理,运用 GIS 空间分析方法,模拟了黑龙江省区域 20 世纪森林氧气释放量的时空变化,为探索人类活动对生态环境的影响提供依据。

1 研究区概况

黑龙江省(121°11'—135°05' E,43°26'—53°33' N)是全国最大的林业省份之一,林业生态地位十分重要。森林类型主要有:北温带落叶针叶林,分布在大兴安岭山地北部,树种以兴安落叶松(*Larix gmelini*)为主;中温带针阔叶混交林,分布于小兴安岭和东部山地。黑龙江省属大陆性季风气候,年平均气温在-4—5℃。气温由东南向西北逐渐降低,南北差近 10℃。全省年平均降水量多介于 400—650 mm。太阳辐射资源比较丰富,年太阳辐射总量在 $46\times10^8\text{--}50\times10^8\text{ J/m}^2$ 之间。其中,5—9 月的太阳辐射总量占全年的 54%—60%。全省日照时数在 2300—2800 h,其中生长季日照时数占总量的 44%—48%。土壤有机质含量高于全国其它地区,黑土、黑钙土和草甸土等占耕地的 60% 以上,是世界著名的三大黑土带之一^[28]。

2 资料来源与处理

2.1 森林覆盖信息

(1) 1900、1949、1986 年黑龙江省森林空间分布。李景文等 1993 年编辑出版的《黑龙江省森林》中,附有清末民初(1896 年)、1949 年、1986 年 1:300 万比例尺的黑龙省森林分布纸质图^[29]。该系列图件描绘了 20 世纪 80 年代前黑龙江省森林类型及其空间分布状况。本文将森林分布纸质图扫描,与具有地理坐标系统的图件进行坐标配准,通过定义地理数据库的属性表及点、线、面矢量化跟踪,完成此系列纸质图的矢量化(图 1—图 3)。

(2) 2009 年黑龙江省森林空间分布。依据 2009 年 9 月 ETM⁺ 遥感影像(覆盖黑龙江省共 39 景影像,条带号为 113—123),采用监督分类法将土地利用类型分为 6 类:耕地、有林地、草地、水域、建设用地和未利用地,提取有林地覆盖图(图 4)。ETM⁺ 遥感影

像从中国科学院遥感研究所购买。

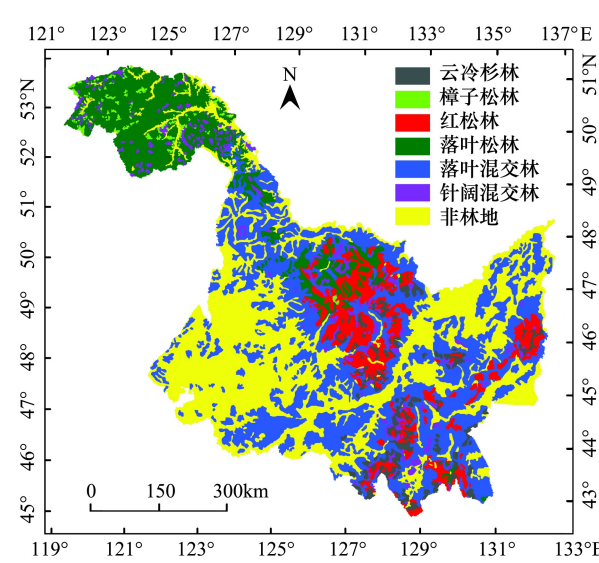


图 1 1900 年黑龙江省森林覆盖空间分布
Fig.1 Spatial distribution of forest covers of the Heilongjiang Province in 1900

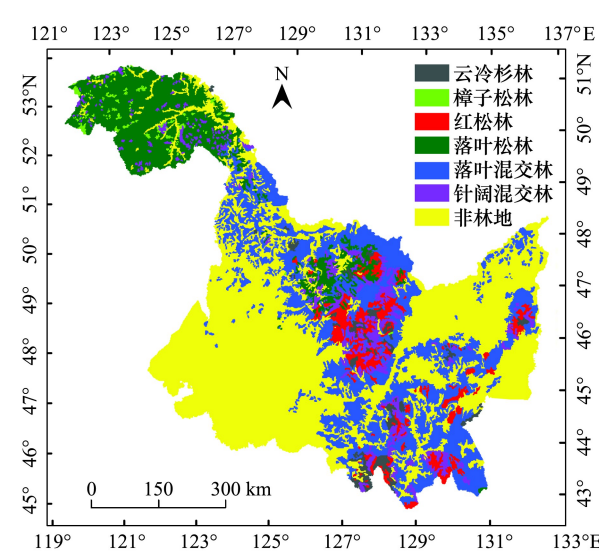


图 2 1949 年黑龙江省森林覆盖空间分布
Fig.2 Spatial distribution of forest covers of the Heilongjiang Province in 1949

2.2 气温和辐射数据获取

为保证模拟结果具有可比性,并减少异常年份波动影响,月平均气温、地面辐射通量分别采用附近 5 年月均值代替。如 1900 年 7 月的平均气温、辐射采用 1900—1905 年 7 月均值代替。

(1) 月平均气温 资料来源于英国东英吉利大学气候研究所(CRU)提供的 0.5°×0.5°逐月网格数据。CRU 气候要素资料是根据陆面实际观测资料插

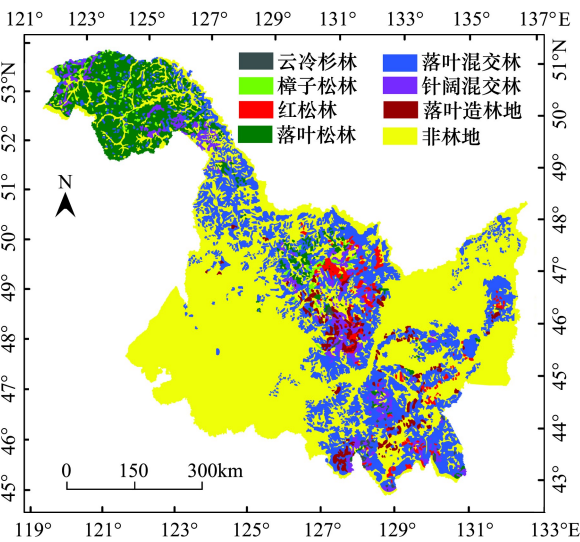


图 3 1986 年黑龙江省森林覆盖空间分布

Fig.3 Spatial distribution of forest covers of the Heilongjiang Province in 1986

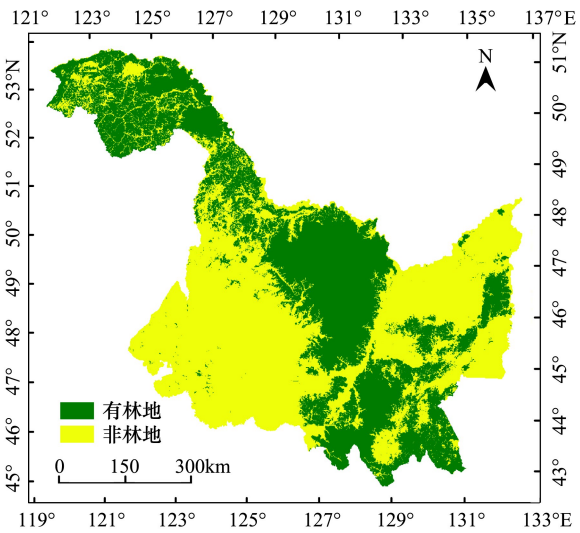


图 4 2009 年黑龙江省森林覆盖空间分布

Fig.4 Spatial distribution of forest covers of the Heilongjiang Province in 2009

值到 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的经纬度网格数据。CRU 资料在中国区域尺度上,与实际观测资料序列吻合得很好,通过了显著性检验^[30]。本文提取 1900—1905 年、1949—1953 年、1986—1990 年、2005—2009 年覆盖黑龙江省及附近的网格资料共 256 个点,采用 Kriging 插值方法,将各年、各月图层叠加,并进行栅格运算,得到 1900 年、1949 年、1986 年、2009 年黑龙江省 3—11 月气温 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 栅格图共 36 幅。

(2)月地面辐射通量 因 CRU 资料中没有地面辐射要素,需要依据云量和天文辐射估算^[31]:

$$S_{g,d} = C_a S_{o,d} \tag{1}$$

式中, $S_{g,d}$ 为地面辐射日总量($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); C_a 为地面总辐射与天文辐射的比例^[31]; $S_{o,d}$ 为天文辐射日总量($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)。

首先计算各纬度天文辐射日总量($S_{o,d}$)^[32],然后提取 1900—1905 年、1949—1953 年、1986—1990 年、2005—2009 年上述 256 个网格点的云量资料,按式(1)计算各网格地面太阳辐射通量,用 Kriging 插值方法,将图叠加平均后,得到 1900 年、1949 年、1986 年、2009 年 3—11 月地面辐射通量 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 栅格图共 36 幅。

2.3 黑龙江省森林植被指数(NDVI)获取

(1)1986 年、2009 年森林植被指数(NDVI)获取。1984—1988 年、2005—2009 年 3—11 月植被指数(NDVI)从美国航天局 NASA 网站下载,分辨率 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。图层叠加平均后,与黑龙江森林分布图叠加,得到 1986 年、2009 年黑龙江省 3—11 月 NDVI 分布图共 18 幅。

(2)1900 年、1949 年森林植被指数(NDVI)获取。将 1986 年黑龙江省森林分布图与 1986 年各月森林 NDVI 图进行叠加,提取各纬度不同林型 3—11 月份 NDVI(表 1,以 $48^{\circ} - 49^{\circ} \text{N}$ 为例),再按纬度按林型赋值到 1900 年、1949 年森林分布图中,得到 1900 年、1949 年黑龙江省 3—11 月 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 森林 NDVI 栅格图 18 幅(以 7 月份为例,图 5—图 6)。

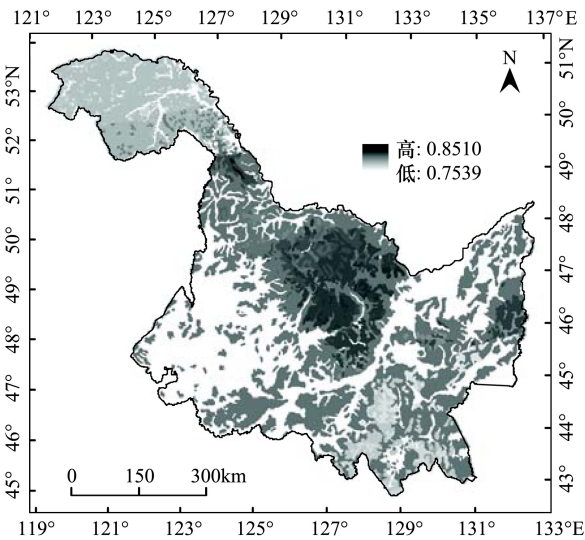


图 5 1900 年 7 月 NDVI 分布图

Fig.5 NDVI distribution map of the Heilongjiang Province in July 1900

表 1 48°—49°N 各月森林 NDVI

林型 Forest type	月份 Month								
	3	4	5	6	7	8	9	10	11
红松林 <i>Pinus koraiensis</i> forest	0.2912	0.3482	0.6096	0.8571	0.8328	0.7749	0.7090	0.4707	0.3321
落叶松林 <i>Larix gmelini</i> forest	0.1928	0.2681	0.5413	0.8523	0.8350	0.7745	0.6786	0.3715	0.2269
云冷杉林 <i>Picea asperata</i> and <i>Abies nephrolepis</i> forest	0.2527	0.3365	0.6008	0.8526	0.8447	0.7649	0.6993	0.4452	0.3111
樟子松林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest	0.2598	0.3229	0.5840	0.8461	0.8187	0.7596	0.6921	0.4434	0.2915
针阔混交林 <i>Coniferous</i> and <i>broad leaved mixed</i> forest	0.2818	0.3388	0.5956	0.8548	0.8292	0.7733	0.7038	0.4530	0.3108
落叶混交林 <i>Deciduous mixed</i> forest	0.1725	0.2601	0.5318	0.8308	0.8282	0.7672	0.6711	0.3713	0.2214

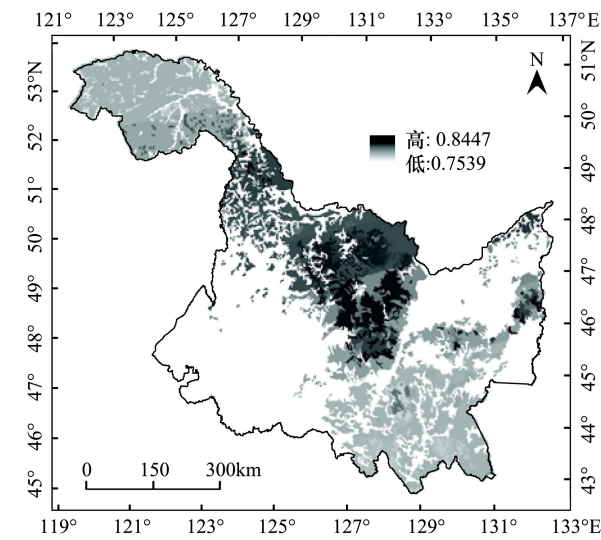


图 6 1949 年 7 月 NDVI 分布图

Fig.6 NDVI distribution map of the Heilongjiang Province in July 1949

3 研究方法

3.1 运用 C-FIX 模型模拟森林净生态系统生产力 (NEP)

C-FIX 模型,是 Veroustraete 在 2002 年提出的网格化光能利用率模型,作者通过对模型进行多次验证和参数修正,使之可以在区域尺度上估算 2 个基本的碳循环分量(GPP、NPP、NEP)。该模型的优点是要求输入的参数少、计算效率高、输出结果的时空分辨率高^[26]。对于每一给定的网格,C-FIX 模型使用以下公式来逐步计算每天的 GPP、NPP 和 NEP 值,单位为 gC m⁻² d⁻¹,下标 d 代表日值:

$$\begin{cases} GPP_d = p(T_{atm}) \times CO_2fert \times \varepsilon \times fAPAR \times c \times S_{g,d} \\ NPP_d = GPP_d \times (1 - A_d) \\ NEP_d = NPP_d - R_{h,d} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $p(T_{atm})$ 为归一化气温依赖因子,取值[0,1];

CO_2fert 为归一化施肥效应因子; $fAPAR$ 为植被可吸收的光合作用有效辐射比例(系数),取值[0,1]。

$$p(T_{atm}) = \frac{e^{(c_1 - \frac{\Delta H_{a,p}}{R_g \cdot T})}}{1 + e^{(\frac{\Delta S \cdot T - \Delta H_{d,p}}{R_g \cdot T})}} \quad (3)$$

$$CO_2fert = \frac{[CO_2] - \frac{[O_2]}{2\tau} K_m \left(1 + \frac{[O_2]}{K_0}\right) + [CO_2]^{ref}}{[CO_2]^{ref} - \frac{[O_2]}{2\tau} K_m \left(1 + \frac{[O_2]}{K_0}\right) + [CO_2]} \quad (4)$$

$$K_m = Ae^{(-E_a/R_gT)} \quad (5)$$

式中, K_m 为核糖 1,5 二磷酸羧化氧化酶与 CO_2 的结合能力; K_0 为 O_2 的阻止力常数; E_a 为气体常数 (KJ/mol); A 为常数。

如果 $T \geq 15\text{ }^{\circ}C$ (288.13 K),那么 $E_{a1} = 59.4$ kJ/mol,且 $A_1 = 2.419 \times 10^{13}$ 。

如果 $T < 15\text{ }^{\circ}C$ (288.13 K),那么 $E_{a2} = 109.6$ kJ/mol,且 $A_2 = 1.976 \times 10^{22}$ 。

计算 K_0 时, $A_0 = 8240$, $E_{a0} = 13.9135$ kJ/mol。

$$\tau = A_{\tau} e^{(-E_{a\tau}/R_gT)} \quad (6)$$

其中, $A_{\tau} = 7.87 \times 10^{-5}$, $E_{a\tau} = -42.8969$ kJ/mol。

$$fAPAR = 1.1638 \times NDVI - 0.1426 \quad (7)$$

$$A_d = (7.825 + 1.145T_a)/100 \quad (8)$$

$$R_{h,d} = k_{s,y} \cdot Q_{10}^{T_a/10} \quad (9)$$

$$k_{s,y} = \frac{\sum_{d=1}^{365} \frac{GPP_d}{b_y}}{\sum_{d=1}^{365} p(T_{atm})_d} \quad (10)$$

式中, A_d 为植被自养呼吸率; $R_{h,d}$ 为土壤异养呼吸通量(gC m⁻² d⁻¹); $K_{s,y}$ 为全年日平均异养呼吸效率(gC m⁻² d⁻¹)。

上述式中还未说明的参数的定义和单位如表 2 所示。

除表 2 中已赋值的参数外,日平均气温、日地面辐射通量、大气 CO₂ 混合浓度、NDVI 是需要输入的参数, K_m 、 K_0 等为中间计算参数。

表 2 C-FIX 模型中参数的描述
Table 2 Description of parameters in the C-FIX model

参数 Parameter	意义 Significance	取值 Value	单位 Unit	参数 Parameter	意义 Significance	取值 Value	单位 Unit
ε	光能利用率	1.10	[gC/MJ]	[CO ₂]	目前测定的大气 CO ₂ 混合浓度		mg/m ³
c	气候效率因子	0.48		[O ₂]	目前测定的大气 O ₂ 混合浓度	20.9	mg/m ³
C_1	常数	21.77		[CO ₂] ^{ref}	基准大气中 CO ₂ 混合浓度	285	mg/m ³
$\Delta H_{a,p}$	有活力分子能量	52750	J/mol	NDVI	植被归一化指数		
T	日平均气温		K	T_a	日平均气温		℃
ΔS	CO ₂ 平衡熵	704.98	J K ⁻¹ mol ⁻¹	Q_{10}	每升高 10℃,植物异氧呼吸相对增加的倍数	1.5	
$\Delta H_{d,p}$	惰性分子能量	211000	J/mol	b_y	土壤异养呼吸年平均标定系数	1.0	
R_g	普适气体常数	8.31	J K ⁻¹ mol ⁻¹				

3.2 通过净生态系统生产力 (NEP) 估算氧气释放量

植物光合作用是植物叶绿素在阳光照射下吸收空气中二氧化碳 (CO₂) 和水 (H₂O), 并将其转化成有机物 (C₆H₁₂O₆) 和氧气。同时, 植物还通过呼吸作用消耗有机物和氧气, 去掉呼吸消耗后剩余的有机碳量, 称为净生态系统生产力 (NEP, gC m⁻² d⁻¹)。NEP 所对应的氧气量即为植物所释放的净氧气量, NEP 与氧气质量比为 1:2.667。

3.3 空间分析方法

采用 ArcGIS 空间叠加、栅格计算、空间统计等分析方法, 计算黑龙江省及各行政区内森林变化及各月、年森林氧气释放量。

3.4 控制实验模拟方法

为研究森林变化对森林氧气释放量的影响, 设计控制实验: 假设百年森林覆盖性质不变, 采用 1900 年森林覆盖信息及 NDVI、2009 年气候要素驱动

C-FIX 模式, 得到控制实验下的森林氧气释放量模拟值。将此模拟值减去 2009 年实际森林氧气释放量模拟值, 所得到的差值为百年森林变化引起的森林氧气释放量变化值, 表达式为:

$$\Delta_{\text{forest}} = O_{2,\text{control}} - O_{2,2009} \tag{11}$$

式中, Δ_{forest} 表示森林变化引起的氧气释放变化量, $O_{2,\text{control}}$ 为控制实验氧气释放量模拟值, $O_{2,2009}$ 为 2009 年实际森林氧气释放量模拟值。

4 结果与分析

4.1 黑龙江省百年森林面积及空间变化

黑龙江省 1900—2009 年森林面积呈持续减少趋势。森林总面积减少了 10.667 万 km², 森林覆盖率减少了 23.568%, 大庆市森林面积减少最多, 约减少了 94.673% (表 3)。空间上以松嫩平原和三江平原减少显著 (图 7)。

表 3 黑龙江省森林面积变化
Table 3 Change of forest areas in the Heilongjiang Province

行政区 Administrative division					减少率 Decrease rate/%	行政区 Administrative division					减少率 Decrease rate/%
面积 Areas/km ²				面积 Areas/km ²							
	1900	1949	1986	2009		1900	1949	1986	2009		
大兴安岭	56729.425	56664.340	52146.890	44655.934	-21.283	双鸭山	12987.010	9166.865	7328.386	7922.788	-38.995
伊春	30257.183	30670.840	23754.310	24930.616	-17.604	鸡西	14263.712	7333.390	5761.247	6083.324	-57.351
哈尔滨	32686.656	25756.552	20537.158	22529.469	-31.074	佳木斯	14885.318	7195.127	5539.874	3873.499	-73.978
鹤岗	7554.764	6218.768	5254.766	4922.680	-34.840	绥化	16161.840	6674.070	4380.125	4618.782	-71.422
牡丹江	33394.696	30228.604	26929.261	26768.776	-19.841	齐齐哈尔	7695.127	1144.739	913.706	906.444	-88.221
黑河	49803.650	36879.624	29326.712	30194.296	-39.373	大庆	6412.986	36879.624	99.703	341.615	-94.673
七台河	4192.208	3440.762	2873.710	2608.782	-37.771	全省	287024.575	221840.900	176920.400	180357.005	-37.163

表中减少率为 1900—2009 年森林面积变化率

黑龙江省 1900—1986 年除樟子松林、针阔混交林面积有所增加外,其它林型面积均减少,其中云冷杉林及红松林面积减少超过 80%(表 4)。

表 4 黑龙江省不同林型面积及其变化/km²

Table 4 Change of area for different forest types in the Heilongjiang province

年份 Year	云冷杉林 <i>Picea asperata</i> and <i>Abies</i> <i>nephrolepis</i> forest	樟子松林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest	红松林 <i>Pinus koraiensis</i> forest	落叶松林 <i>Larix gmelini</i> forest	落叶混交林 <i>Deciduous</i> <i>mixed</i> forest	针阔混交林 <i>Coniferous</i> and broad leaved mixed forest
1900	15891.118	3172.865	37302.785	61797.674	153505.370	15354.759
1949	8252.843	2664.037	19197.128	58991.116	109969.639	22766.157
1986	1125.928	3419.048	7035.549	42777.445	105461.010	16303.671
减少率/% Decrease rate	-92.915	7.759	-81.139	-30.778	-31.298	6.180

4.2 黑龙江省 20 世纪森林氧气释放量模拟结果分析

4.2.1 森林氧气释放量变化及空间分布

将 1900 年、1949 年、1986 年及 2009 年日平均气温、日平均辐射(均用月平均值代替)、CO₂ 浓度^[33](用年平均浓度代替)及其它参数输入 C-FIX 模型,计算 NEP,换算成氧气释放量。采用 ArcGIS 空间统计功能计算出各月及年森林氧气释放量(表 5),年氧气释放量空间分布如图 8—图 11。

表 5 黑龙江省百年森林氧气释放量模拟结果(万 t)

Table 5 Simulated results of oxygen release in forests of the Heilongjiang Province in 1900—2009

年份 Year	月份 Month									年总量 Annual total
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1900	67.622	403.793	2209.667	4951.906	5229.030	4836.383	2739.034	475.995	58.474	20971.907
1949	45.431	354.483	2288.604	4602.830	4760.323	3766.342	1629.043	369.017	40.805	17856.964
1986	30.709	261.387	1733.546	3928.202	3740.356	3099.180	1681.427	271.543	28.501	14776.054
2009	49.522	313.586	1917.915	3334.077	3968.617	3615.644	1846.385	269.542	35.054	15350.343

表中各年的 1—2 月、12 月黑龙江森林 NDVI 近似为 0,故森林氧气释放量为 0

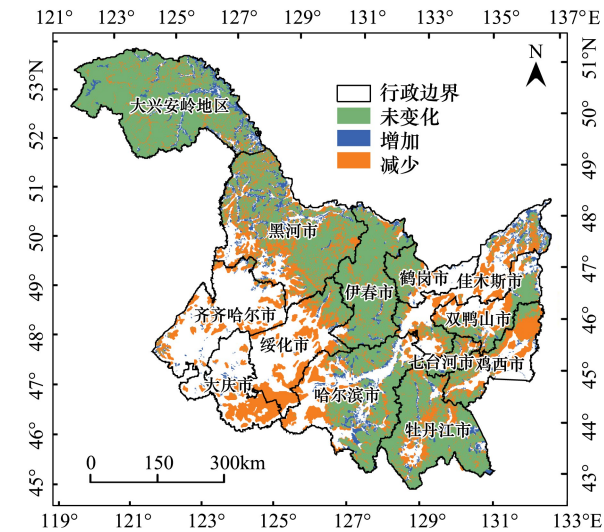


图 7 黑龙江省 1900—2009 年百年森林面积变化

Fig.7 Change of forest area in the Heilongjiang Province from 1900 to 2009

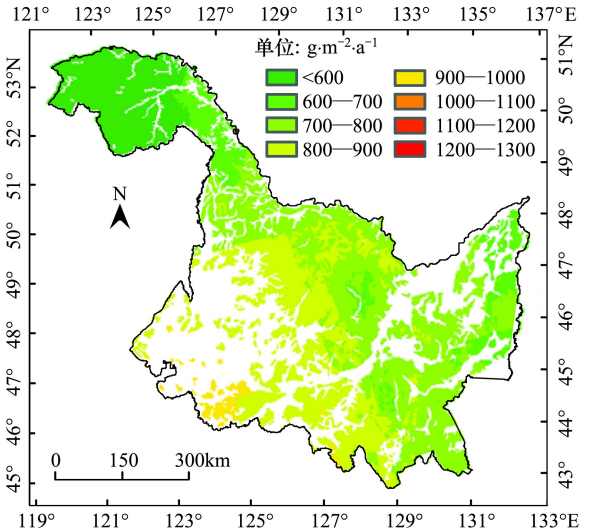


图 8 黑龙江省 1900 年森林氧气释放量年总量空间分布

Fig.8 Spatial distribution of total annual oxygen release of the Heilongjiang Province in 1900

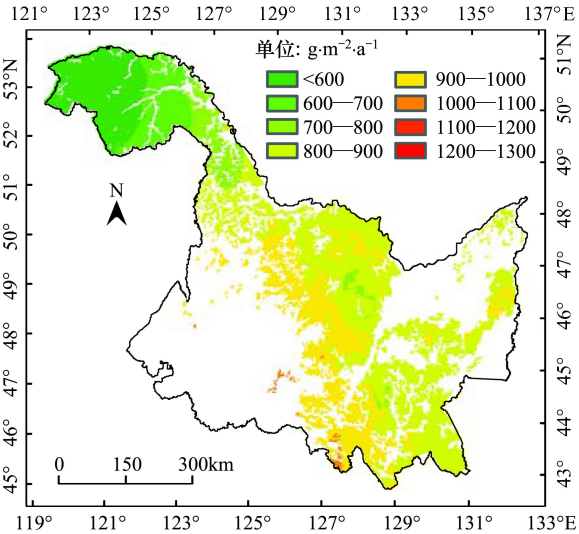


图 9 黑龙江省 1949 年森林氧气释放量年总量空间分布
Fig.9 Spatial distribution of total annual oxygen release of the Heilongjiang Province in 1949

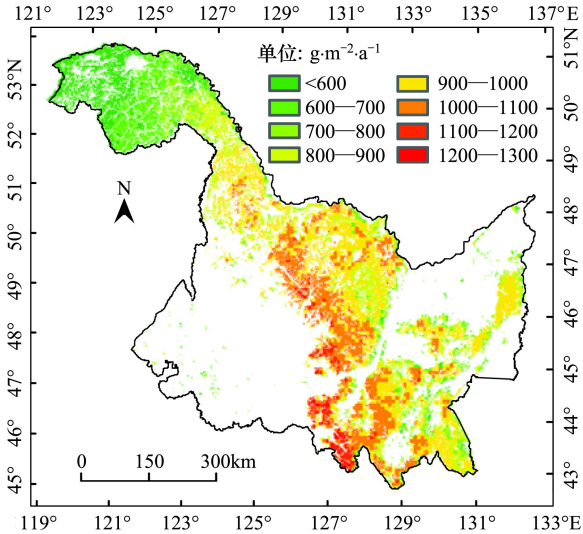


图 11 黑龙江省 2009 年森林氧气释放量年总量空间分布
Fig.11 Spatial distribution of total annual oxygen release of the Heilongjiang Province in 2009

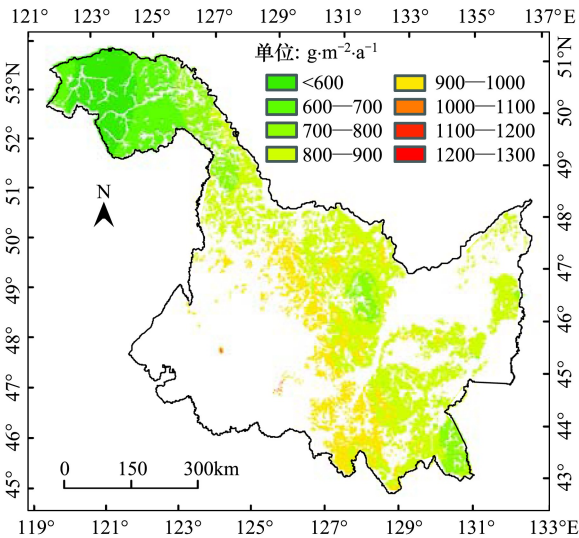


图 10 黑龙江省 1986 年森林氧气释放量年总量空间分布
Fig.10 Spatial distribution of total annual oxygen release of the Heilongjiang Province in 1986

可见,20 世纪百年间黑龙江省全年森林氧气释放量呈减少趋势,2009 年较 1900 年减少了 5621.564 万 t,占 1900 年的 26.805%。全年森林氧气释放量空间分布趋势基本一致,均呈现南高北低趋势;但空间变化明显,1900 年全省范围内均有森林覆盖,尤其是西南部有面积广泛的森林能释放氧气,其氧气释放量也最高,而到 1949 年后其森林基本消失,变为全省最低区域,基本为 0;同样特征也出现在三江平原。

4.2.2 各行政区森林氧气释放量变化

黑龙江省各行政区百年间森林氧气释放量除伊

春微弱增加外,其余行政区均呈减少趋势(表 6)。其中大庆市、齐齐哈尔市减少显著,超过 90%。将 1900 年及 2009 年各行政区氧气释放量进行显著性检验,其概率检验值为 0.000,说明百年来黑龙江省森林氧气释放量减少极显著。

4.2.3 黑龙江省百年不同林型氧气释放量变化

黑龙江省近百年间(1900—1986 年),由云冷杉林释放的氧气量减少了 91.855%,红松林减少了 78.905%,落叶混交林、落叶松林分别减少了 25.043%、23.936%;针阔混交林、樟子松林氧气生产量有所增加。单位面积云冷杉林、红松林释放氧气量最多,落叶松林、樟子松林稍低(表 7)。

4.3 黑龙江省百年森林变化对氧气释放量影响

控制实验结果表明, $O_{2,control}$ 为 25952.407 万 t, $O_{2,2009}$ 为 15350.343 万 t, Δ_{forest} 为 -10602.060 万 t,相当于 1900 年氧气释放量的 50.554%,说明百年来森林面积变化导致黑龙江省区域年氧气释放量减少了约 50%。

将 2009 年氧气释放量分布图与控制试验模拟值分布图叠加相减,得到森林面积变化影响下森林氧气释放量空间变化图(图 12)。对比图 7,氧气释放量增加区域与森林面积不变或增加区域吻合,减小区域与森林面积减少区域吻合;而 1900—2009 年黑龙江省年平均温度提高了 1.15℃,年平均辐射量增加 0.0186 MJ m⁻² a⁻¹,大气中 CO₂ 浓度增加了 84 mg/m³,气候变化有利于森林氧气释放量增加,表 7

表 6 黑龙江省各行政区百年森林氧气释放量变化

Table 6 Changes of oxygen release in different administrative divisions in the Heilongjiang Province during the Past Century											
行政区 Administrative division	氧气释放量 Oxygen release(×10 ⁴ t)				减少率 Decrease rate/%	行政区 Administrative division	氧气释放量 Oxygen release/(×10 ⁴ t)				减少率 Decrease rate/%
	1900	1949	1986	2009			1900	1949	1986	2009	
大庆	582.904	0	10.109	20.423	−96.496	黑河	3829.228	3181.917	2523.555	2833.676	−25.999
齐齐哈尔	664.312	109.100	81.141	72.433	−89.097	鹤岗	578.123	543.311	450.333	441.986	−23.548
佳木斯	1072.91	623.271	472.252	330.655	−69.182	哈尔滨	2701.851	2379.568	1880.472	2255.278	−16.528
绥化	1386.593	628.530	406.911	482.854	−65.177	大兴安岭	3037.534	3409.736	3295.367	2754.864	−9.306
鸡西	1030.339	641.479	483.237	510.848	−50.419	牡丹江	2544.448	2599.748	2298.391	2385.527	−6.246
双鸭山	921.746	790.335	602.377	680.901	−26.129	伊春	2311.748	2651.208	2026.009	2351.636	1.725
七台河	310.171	298.761	245.900	229.262	−26.085	全省	20971.907	17856.964	14776.054	15350.343	−26.805

表 7 各林型单位面积氧气释放量

Table 7 The unit area oxygen release of different forest types						
年份 Year	云冷杉林 <i>Picea asperata</i> and <i>Abies</i> <i>nephrolepis</i> forest	樟子松林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest	红松林 <i>Pinus koraiensis</i> forest	落叶松林 <i>Larix gmelini</i> forest	落叶混交林 <i>Deciduous mixed</i> forest	针阔混交林 <i>Coniferous and broad</i> <i>leaved mixed forest</i>
1900	7.922	5.221	7.765	5.878	7.760	7.207
1949	9.062	5.747	8.890	6.431	8.640	8.553
1986	9.107	7.180	8.686	6.459	8.466	8.169
平均 Average	8.697	6.049	8.447	6.256	8.289	7.976

中结果也说明各林型单位面积氧气释放量呈增加趋势)。由此可见,20 世纪由于人类活动引起的森林面积减少,是影响黑龙江省森林氧气释放量减少的主要因素。

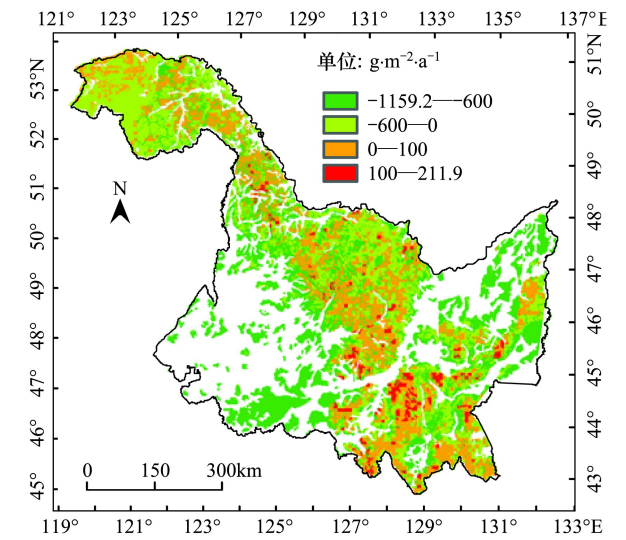


图 12 百年森林面积变化对森林氧气释放量的影响模拟
Fig.12 Simulated effects of forest area change during a hundred years on quantity of oxygen release

5 讨论

(1)较多学者采用碳氧平衡法对不同区域森林

年氧气释放量进行了估算。如张颖^[22]等根据 GPP 估算出郑州市 2010 年森林年氧气释放量为 24.07 t/hm²;彭江颖等、管东生等按 NPP 估算森林年释放氧气 12.70、10.59 t/hm²^[23-24];苏继申等利用 NPP 估算阔叶混交林、针叶混交林年氧气释放量分别为 12.52、13.51 t/hm²^[34];邓毅等估算出常绿阔叶林、落叶阔叶林、北方针叶林年释放氧气为 18.53、17.11、11.39 t/hm²^[35];Nakazawa 等认为阔叶林年放出氧气 18.25 t/hm²^[36];Berbigier 等估算法国森林年氧气释放量为 11.468 t/hm²^[37];本文依据 NEP 模拟的黑龙 江省森林年氧气释放量为 8.055 t/hm²,不同林型介于 6.049—8.697 t/hm²之间。由于研究区域及依据不同,以上结果在数量上虽有所差异,但均处于同一量级;基于 GPP 或 NPP 估算结果,由于没有充分考虑呼吸消耗,因此数量上比本文模拟结果偏大;不同学者采用不同方法模拟 NPP(如采用森林蓄积量、生物量、文献查阅及经验估算等),是产生氧气释放量差异的原因。本文模拟结果表明,云冷杉林、红松林年氧气释放量最多,这一结果与苏继申研究结果相吻合^[34]。

(2)近几年来,C-FIX 模型较多地被国内外学者应用。如 Veroustraete 等使用 NOAA/AVHRR 的 NDVI 数据分别对比利时、全欧洲植被 NPP 和 NEP

进行了模拟^[38-39];卢玲使用 SPOT/VEGETATION 遥感数据估算了中国西部地区 NPP 和 NEP^[26];张冬有利用 C-FIX 模型较好地模拟了黑龙江省森林 NPP^[28]。结果表明,C-FIX 模型能较好地模拟区域植被各级生产力。本文采用 C-FIX 模型模拟了黑龙江省森林 NEP,其精确性与森林氧气释放量模拟值的精度密切相关。因此,对模拟精度进行了检验。利用伊春 1986 年森林资源清查的蓄积量数据,在伊春区域随机抽取 37 个样区,根据蓄积量—生产力关系模型^[40],计算出 NPP,再采用东北地区土壤异养呼吸模型^[41],计算出相应样区的 NEP,并将单位换算为 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。与本文相应样区 NEP 模拟值进行对比,均方差根(RMSE)为 16.33,为原始值的 3.8%—5.0%,模型拟合度较高。另外,由于黑龙江省年平均气温较低,本文模拟的黑龙江省森林 NEP 年均值为 $316.727 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$,略低于国内模拟的各种林型 NEP 平均值($578 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$)^[42],结果合理。

(3)1900 年、1949 年和 1986 年黑龙江森林分布图是本文模拟森林生产力的基础图件,因此需对其矢量化精度进行检验。①20 世纪 80 年代末黑龙江省政府及省测绘局对全省森林资源野外普查,将其分为 96 种林型并对其空间分布进行了详细记录。因此,以 1986 年为例,使用 ArcGIS 中 Fishnet 工具创建该年森林分布 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 格网,全省共生成 10692 个格网,其中含林地格网共 2088 个,随机选择 100 个格网的森林类型与实际普查进行对比,吻合率近 100%;②1949 年、1986 年矢量化的森林面积,与历史文献中^[43]森林清查数据分别相差 -2.093 万 hm^2 、 1.921 万 hm^2 ,占总量的 10%左右,误差较小。但历史文献中关于清末民初森林面积记载数据相差较大,如 1917 年满铁调查机构根据地面典型调查和实地调查,认为黑龙江省森林面积为 3301.73 万 hm^2 ^[44],与本文矢量化结果相差 4.315 万 hm^2 ,而文献^[29]记载黑龙江省清末民初森林面积为 4692.9 万 hm^2 ,其面积大于黑龙江省行政区面积,也远大于 1917 年调查数据。分析其原因可能是历史文献中记载的清末民初森林面积,包括了山地坡地上的森林面积,而本文矢量化数据统计过程中,对坡地森林面积统计有所遗漏。③本文对 1949 年、1986 年各行政区矢量化森林面积与文献^[29]记载数据也进行了对比,除大兴安岭和黑河市误差较大外,其他行政区误

差均在 10%之内,而历史文献中记载的大兴安岭及小兴安岭的森林面积均是估计值^[43]。综合以上结论,本文对黑龙江省历史时期森林分布矢量化精度是可信的。

(4)在模拟过程中,NDVI 是输入参数之一,而 1900 年、1949 年没有 NDVI 数据源,因此如何获取成为关键。陈云浩等指出,虽然 NDVI 是多种因素(气象、水文、地貌)综合作用的结果,但在中国东北,地形变化和植被类型是影响 NDVI 变化的主要因素,气候变化对中国东北大面积地带性植被 NDVI 变化没有明显影响^[44]。本文随机选择落叶松林、红松林、落叶混交林为代表,在 1982—2009 年 8 月 NDVI 图层中,随机各提取 10 个样本进行平均,分析得出近 30 年来森林 NDVI 年变化很小,变异系数分别为 0.0028、0.0021 和 0.0028。因此,本文依据近代森林与 NDVI 数据源,提取不同纬度各林型 NDVI,然后按同纬度同林型赋值到历史时期森林分布图中,获取历史时期森林 NDVI。具体操作见 2.3。

用两种方法对历史时期 NDVI 进行检验。①采用赋值法重建 2009 年森林 NDVI,与网站下载同期 NDVI 比较。在每个纬度内随机选取同一林型 NDVI 样本共 50 个,其平均值相差很小,落叶松林、红松林、落叶混交林、樟子松林、云冷杉林、针阔混交林分别为 -0.00019 、 -0.00125 、 -0.0001 、 -0.001333 、 0.0002 、 0.00347 ,其样本间标准差分别为 0.002456 、 0.002174 、 0.000604 、 0.00265 、 0.005293 、 0.00264 ,说明样本间差异很小。②以 1986 年为例,分别按实际 NDVI 和赋值 NDVI,计算了黑龙江省全年森林氧气释放量,仅相差 12.369 万 t ,占总量的 0.084%。以上说明本文所提出的对历史时期森林 NDVI 赋值方法,对森林氧气释放量模拟值影响很小。

(5)本文没有考虑森林林分状况及林龄等森林性质对氧气释放量的影响,而森林处于不同林龄期,NDVI 可能相同,在同样气候条件下,其碳积累速率及积累量有可能不同,最终会导致氧气释放量不同。这些生理因素对森林氧气释放量的影响需要今后更深入的研究加以说明。此外,本文仍然具有较多的不确定性。比如历史时期黑龙江省森林分布图,是目前能获取到的描述历史时期黑龙江省森林分布最详细的图件,但是该图的精度可能值得商榷;纸质图件矢量化及遥感影像解译过程中,会出现图形纠正、

边界跟踪、误判等人为误差;在图层转化、叠加、裁切、拼接等过程中,也会出现界线对接、空间统计等误差。以上因素都会给模拟结果带来误差。

6 结论

本文利用历史文献及遥感影像资料,重建了 20 世纪黑龙江省 4 个时间断面的森林空间分布图,基于 C-FIX 模型及碳氧平衡方法,模拟并分析了 20 世纪黑龙江省森林氧气释放量及其时空变化趋势,为研究过去百年黑龙江省森林变化及由此引起的生态环境效应提供了基础数据,为更进一步研究人类活动对区域环境变化的影响提供了依据。

黑龙江省百年森林面积呈持续减少趋势,森林总面积减少了 10.667 万 km²,森林覆盖率减少了 23.568%;各行政区森林面积均呈减少趋势,大庆市森林面积减少最多,约减少了 94.673%,空间上以松嫩平原和三江平原减少显著;除樟子松林、针阔混交林面积有所增加外,其它林型面积均减少,其中云冷杉林、红松林减少率在 80%以上;黑龙江省百年来森林年氧气释放量呈减少趋势,共减少 5621.564 万 t,约占 1900 年的 26.805%;百年来各行政区森林年氧气释放量除伊春微弱增加外,其余行政区均呈减少趋势,其中大庆市、齐齐哈尔市减少显著,减少了 90%以上;人类活动引起的森林面积减少是影响黑龙江省森林氧气释放量减少的主要因素。

References:

[1] Chen Y W. For safety and health of human survival atmosphere “oxygen exhaustion” causes than “global greenhouse effect” more serious consequences. *China Population, Resources And Environment*, 2008, 18:286-289.

[2] Bekker A, Holland H D, Wang P L, Rumble D, Stein H J, Hannah J L, Coetzee L L, Beukes N J. Dating the rise of atmospheric oxygen. *Nature*, 2004, 427(6970): 117-120.

[3] Goldblatt C, Lenton T M, Watson A J. Bistability of atmospheric oxygen and the Great Oxidation. *Nature*, 2006, 443 (7112): 683-686.

[4] Lenton T M. The coupled evolution of life and atmospheric oxygen. New York: Academic Press, 2003: 4-5.

[5] Kasting J F. Earth’s early atmosphere. *Science*, 1993, 259 (5097): 920-926.

[6] Manning A C, Keeling R F, Katz L E, Paplawsky W J, Mcevoy E M. Interpreting the seasonal cycles of atmospheric oxygen and carbon dioxide concentrations at American Samoa Observatory. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(6): 1328-1333.

[7] Keeling R F, Shertz S R. Seasonal and interannual variations in atmospheric oxygen and implications for the global carbon cycle. *Nature*, 1992, 358(6389): 723-727.

[8] Jacobsen D. Low oxygen pressure as a driving factor for the altitudinal decline in taxon richness of stream macroinvertebrates. *Community Ecology*, 2008, 154(4): 795-807.

[9] Zhou H F. Discussion in synthetic index of climatic change influence on human health. *Climatic and Environmental Research*, 1999, 4 (1): 121-126.

[10] Sun J M. The oxygen content in the atmosphere in eighty million years is more than its today. *Fossil*, 1988, (3): 29-29.

[11] Claire M W, Catling D C, Zahnle K J. Biogeochemical modelling of the rise in atmospheric oxygen. *Geobiology*, 2006, 4 (4): 239-269.

[12] Sreenivas B, Murakami T. Emerging views on the evolution of atmospheric oxygen during the Precambrian. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 2005, 100 (5): 184-201.

[13] Santilli R M. Alarming oxygen depletion caused by hydrogen combustion and fuel cells and their resolution by magnegas. *International Hydrogen Energy Forum*, Munich, Germany, 2000: 1-15.

[14] Shen X. Retrospect of photobiology in China. *Acta Biophysica Sinica*, 2010, 26(11): 942-949.

[15] Francis S, Johnson C. The balance of atmospheric oxygen and carbon dioxide. *Biological Conservation*, 1970, 2(2): 83-89.

[16] Johnson F S. The oxygen and carbon dioxide balance in the earth’s atmosphere // *The Changing Global Environment*. Netherlands: Springer, 1975, 76: 49-56.

[17] IPCC. Climate Change 1995-The science of climate change: Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 1996: 3-4.

[18] Bbortkovskii R S, Egorov B N, Kattsov V M, Pavlova T V. Model estimates for the mean gas exchange between the ocean and the atmosphere under the conditions of the present-day climate and its changes expected in the 21st century. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2007, 43(3): 378-383.

[19] Cai W J, Pomeroy L R, Moran M A, Wang Y. Oxygen and carbon dioxide mass balance for the estuarine-intertidal marsh complex of five rivers in the southeastern U.S. *Limnology and Oceanography*, 1999, 44(3): 639-649.

[20] Wu Z Q. The research on the oxygenous regional eco-compensation and its model construction [D]. Chengdu Southwest University, 2009.

[21] Chen B, Shan L. Valuing ecological services of green space of west lake scenic area in Hangzhou. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2009, 35 (6): 686-690.

[22] Zhang Y, Wang Q, Li B J, Wang W M. Study on forecasting ecological land demand with carbon-oxygen balance method. *China Land Science*, 2007, 21 (6): 23-28.

[23] Peng J Y. Roles of vegetation on balance of carbon and oxygen in the pearl river delta. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2003, 42 (5): 105-108.

[24] Guan D S, Chen Y J, Huang F F. The storage and distribution of carbon in urban vegetation and its roles in balance of carbon and oxygen in Guangzhou. *China Environmental Science*, 1998, 18 (5): 437-441.

[25] Ma J Y, Yin K, Lin T. Analysis of the carbon and oxygen balance of a complex urban ecosystem; A case study in the coastal city of Xiamen. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31 (8): 1808-1816.

[26] Lu L. In the western of China, net primary productivity and carbon cycle research [D]. Chinese Academy of Sciences, Beijing, 2003.

[27] Lu L, Li X, Veroustraete F. Terrestrial net primary productivity

and its spatial-temporal variability in western China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1026-1032.

[28] Zhang D Y. Estimation of forest net primary productivity in Heilongjiang province based on remote sensing[D]. Beijing Forest University, Beijing, 2009.

[29] Li J W. The forest of Heilongjiang Province. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1993.

[30] Fang X Q, Zhang X Z, Dai Y J, Li B B, Hou G L. Regionalization of winter temperature change over mainland of China during 1951—2005. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(4): 571-576.

[31] Huang Z Z, Pan Y Q. A statistics-based method for hourly sun radiation calculation // A Collection of Papers of the 2008 Academic annual Meeting by the Chinese Association of Refrigeration. Beijing: Chinese Architectural Press, 2008: 105-109.

[32] Zhou S Z, Zhang R Y, Zhang C. Meteorology and Climatology. Beijing: Higher Education Press, 2003.

[33] Yan K. Research on tendency equation about the concentration data of carbon dioxide in the atmosphere over the past 60 years. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(5): 1665-1670.

[34] Su J S, Zhuang J Y, Gu Y, Min J J. Benefit assessment of carbon fixation and manufacturing oxygen of urban forests in Nanjing city. *China Forestry Science and Technology*, 2010, 24(3): 49-52.

[35] Deng Y, Gong Z X. Research on the calculate methods of urban ecological park's utility function capability. *Sichuan Building Science*, 2010, 36(3): 304-307.

[36] Nakazawa T. Variation and carbon dioxide and methane in the atmosphere and their global cycles. *Global Environment Research*, 1997, 2: 5-14.

[37] Berbigier P, Bonnefond J M, Mellmann P. CO₂ and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(3): 183-197.

[38] Veroustraete F, Patyn J, Myneni R B. Estimating net ecosystem exchange of carbon using the normalized difference vegetation index and an ecosystem model. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(1): 115-130.

[39] Sabbe H, Eerens H, Veroustraete F. Estimation of the carbon balance of European terrestrial ecosystems by means of the C-FIX model // The 1999 EUMETSAT Meteorological Satellite Data User's Conference. Copenhagen: EUMETSAT, 1999: 271-278.

[40] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5): 497-508.

[41] Zhou T, Shi P J, Sun R, Wang S Q. The impacts of climate change on net ecosystem production in China. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3): 357-365.

[42] Zhang J, Yuan W G, Ge Y, Jiang B, Zhu J R, Shen A H, Chang J. Carbon storage and its sequestration potential by ecological service forest in Zhejiang. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3839-3848.

[43] Wu Q J. Looks at Heilongjiang Province forest vicissitude from the forest area examination and explanation. 2006 Doctoral Forum of China, 2006: 1621-1626.

[44] Chen Y H, Li X B, Chen J, Shi P J. The change of ndvi time series based on change vector analysis in china, 1983—1992. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(1): 12-19.

2008, 18: 286-289.

[9] 周后福. 气候变化对人体健康影响的综合指标探讨. *气候与环境研究*, 1999, 4(1): 121-126.

[10] 孙家明. 八千万年前大气中的氧含量比现在高. *化石*, 1988, (3): 29-29.

[14] 沈恂. 中国光生物学研究的历史回顾. *生物物理学报*, 2010, 26(11): 942-949.

[20] 吴中全. 氧气区域生态补偿及其模型构建研究 [D]. 成都: 西南大学, 2009.

[21] 陈波, 卢山. 杭州西湖风景区绿地生态服务功能价值评估. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2009, 35(6): 686-690.

[22] 张颖, 王群, 李边疆, 王万茂. 应用碳平衡法测算生态用地需求量实证研究. *中国土地科学*, 2007, 21(6): 23-28.

[23] 彭江颖. 珠江三角洲植被对区域碳氧平衡的作用. *中山大学学报: 自然科学版*, 2003, 42(5): 105-108.

[24] 管东生, 陈玉娟, 黄芳芳. 广州城市绿地系统碳的贮存-分布及其在碳氧平衡中的作用. *中国环境科学*, 1998, 18(5): 437-441.

[25] 马巾英, 尹锴, 吝涛. 城市复合生态系统碳氧平衡分析——以沿海城市厦门为例. *环境科学学报*, 2011, 31(8): 1808-1816.

[26] 卢玲. 中国西部地区净初级生产力及碳循环研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003: 25-29.

[27] 卢玲, 李新, Frank V. 中国西部地区植被净初级生产力的时空格局. *生态学报*, 2005, 25(5): 1026-1032.

[28] 张冬有. 黑龙江省森林植被净初级生产力遥感估算研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2009: 94-95.

[29] 李景文. 黑龙江森林. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1993.

[30] 方修琦, 张学珍, 戴玉娟, 李蓓蓓, 侯光良. 1951—2005 年中国大陆冬季温度变化过程的区域差异. *地理科学*, 2010, 30(4): 571-576.

[31] 黄治钟, 潘毅群. 一种基于统计的逐时太阳辐射数据计算方法 // 中国制冷学会 2008 年学术年会论文集. 北京: 中国建筑出版社, 2008: 105-109.

[32] 周淑贞, 张如一, 张超. 气象学与气候学. 北京: 高等教育出版社, 2003: 156-156.

[33] 阎坤. 60 年来大气中二氧化碳浓度数据的趋势方程研究. *地球物理学进展*, 2009, 24(5): 1665-1670.

[34] 苏继申, 庄家尧, 顾叶, 閔俊杰. 南京市城市森林固碳制氧效益研究. *林业科技开发*, 2010, 24(3): 49-52.

[35] 邓毅, 龚兆先. 城市生态公园使用功能总容量的计算方法研究. *四川建筑科学研究*, 2010, 36(3): 304-307.

[40] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.

[41] 周涛, 史培军, 孙睿, 王绍强. 气候变化对净生态系统生产力的影响. *地理学报*, 2004, 59(3): 357-365.

[42] 张骏, 袁位高, 葛滢, 江波, 朱锦茹, 沈爱华, 常杰. 浙江省生态公益林碳储量和固碳现状与潜力. *生态学报*, 2010, 30(14): 3839-3848.

[43] 伍启杰. 从森林面积的考释看近代黑龙江省森林的变迁. 2006 年全国博士生学术论坛, 2006: 1621-1626.

[44] 陈云浩, 李晓兵, 陈晋, 史培军. 1983—1992 年中国陆地植被 NDVI 演变特征的变化矢量分析. *遥感学报*, 2002, 6(1): 12-19.

参考文献:

[1] 陈一文. 对人类持续安全健康生存, 大气“氧气枯竭”造成比“全球温室效应”更为严重恶果. *中国人口·资源与环境*,

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34 ,No.2 Jan. ,2014 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

Effects of soil texture on variations of paddy soil physical and chemical properties under continuous no tillage GONG Dongqin, LÜ Jun (239)

Evaluation of the landscape patterns vulnerability and analysis of spatial correlation patterns in the lower reaches of Liaohe River Plain SUN Caizhi, YAN Xiaolu, ZHONG Jingqiu (247)

Effects of light and dissolved oxygen on the phenotypic plasticity of *Alternanthera philoxeroides* in submergence conditions XU Jianping, ZHANG Xiaoping, ZENG Bo, et al (258)

A review of the relationship between algae and bacteria in harmful algal blooms ZHOU Jin, CHEN Guofu, ZHU Xiaoshan, et al (269)

Biodiversity and research progress on picophytoplankton in saline lakes WANG Jiali, WANG Fang (282)

Effects of ozone stress on major plant physiological functions LIE Ganwen, YE Longhua, XUE Li (294)

The current progress in rodents molecular phylogeography LIU Zhu, XU Yanchun, RONG Ke, et al (307)

The progress in ecosystem services mapping: a review ZHANG Liwei, FU Bojie (316)

Autecology & Fundamentals

Growth, and cationic absorption, transportation and allocation of *Elaeagnus angustifolia* seedlings under NaCl stress LIU Zhengxiang, ZHANG Huaxin, YANG Xiuyan, et al (326)

Leaf morphology and PS II chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *Sinosenecio jishouensis* in Different Habitats XIANG Fen, ZHOU Qiang, TIAN Xiangrong, et al (337)

Response of change of wheat LAI measured with LAI-2000 to the radiance WANG Yan, TIAN Qingjiu, SUN Shaojie, et al (345)

Effects of K⁺ and Cr⁶⁺ on larval development and survival rate of the acorn barnacle *Balanus reticulatus* HU Yufeng, YAN Tao, CAO Wenhao, et al (353)

Diffusion of colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*, adults in field LI Chao, PENG He, CHENG Dengfa, et al (359)

Population, Community and Ecosystem

Seasonal variations in fish community structure in the Laizhou Bay and the Yellow River Estuary SUN Pengfei, SHAN Xiujuan, WU Qiang, et al (367)

Variations in fish community structure and diversity in the sections of the central and southern Yellow Sea SHAN Xiujuan, CHEN Yunlong, DAI Fangqun, et al (377)

Research on the difference in eutrophication state and indicator threshold value determination among lakes in the Southern Jiangsu Province, China CHEN Xiaohua, LI Xiaoping, WANG Feifei, et al (390)

Effect of tidal creek system on the expansion of the invasive *Spartina* in the coastal wetland of Yancheng HOU Minghang, LIU Hongyu, ZHANG Huabing (400)

The spatial and temporal variations of maximum light use efficiency and possible driving factors of Croplands in Jiangsu Province KANG Tingting, GAO Ping, JU Weimin, et al (410)

Simulation of summer maize yield influenced by potential drought in China during 1961—2010 CAO Yang, YANG Jie, XIONG Wei, et al (421)

Forest change and its impact on the quantity of oxygen release in Heilongjiang Province during the Past Century ZHANG Lijuan, JIANG Chunyan, MA Jun, et al (430)

Soil macro-faunal guild characteristics at different successional stages in the Songnen grassland of China	LI Xiaoqiang, YIN Xiuqin, SUN Lina (442)
Seasonal dynamics of soil microbial biomass in six forest types in Xiaoxing'an Mountains, China	LIU Chun, LIU Yankun, JIN Guangze (451)
Landscape, Regional and Global Ecology	
Variation of drought and regional response to climate change in Huang-Huai-Hai Plain ...	XU Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al (460)
Wind speed changes and its influencing factors in Southwestern China	ZHANG Zhibin, YANG Ying, ZHANG Xiaoping, et al (471)
Characteristics of soil carbon density distribution of the <i>Kobresia humilis</i> meadow in the Qinghai Lake basin	CAO Shengkui, CHEN Kelong, CAO Guangchao, et al (482)
Life cycle assessment of carbon footprint for rice production in Shanghai	CAO Liming, LI Maobai, WANG Xinqi, et al (491)
Research Notes	
Seasonal changes of ground vegetation characteristics under artificial <i>Caragana intermedia</i> plantations with age in desert steppe	LIU Rentao, CHAI Yongqing, XU Kun, et al (500)
The experimental study on trans-regional soil replacement	JIN Yinghua, XU Jiawei, QIN Lijie (509)
Sensitivity analysis of swat model on changes of landscape pattern: a case study from Lao Guanhe Watershed in Danjiangkou Reservoir Area	WEI Chong, SONG Xuan, CHEN Jie (517)

《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

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 2 期 (2014 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 2 (January, 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

主 编 王如松

主 管 中国科学技术协会

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

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂

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

订 购 全国各地邮局

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

广告经营 京海工商广字第 8013 号

许 可 证

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

Editor-in-chief WANG Rusong

Supervised by China Association for Science and Technology

Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China

