

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

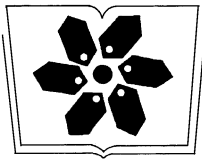
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 19 期 Vol.32 No.19 **2012**

中国生态学会
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 19 期 2012 年 10 月 (半月刊)

目次

中国野生东北虎数量监测方法有效性评估	张常智, 张明海, 姜广顺 (5943)
城市居民食物氮消费变化及其环境负荷——以厦门市为例	于洋, 崔胜辉, 赵胜男, 等 (5953)
珠江口水域夏季小型底栖生物群落结构	袁俏君, 苗素英, 李恒翔, 等 (5962)
2010 年夏季雷州半岛海岸带浮游植物群落结构特征及其与主要环境因子的关系	龚玉艳, 张才学, 孙省利, 等 (5972)
阿根廷滑柔鱼两个群体间耳石和角质颞的形态差异	方舟, 陈新军, 陆化杰, 等 (5986)
黄河三角洲滨海草甸与土壤因子的关系	谭向峰, 杜宁, 葛秀丽, 等 (5998)
盘锦湿地净初级生产力时空分布特征	王莉雯, 卫亚星 (6006)
菜豆根瘤菌对土壤钾的活化作用	张亮, 黄建国, 韩玉竹, 等 (6016)
花生植株和土壤水浸液自毒作用研究及土壤中自毒物质检测	黄玉茜, 韩立思, 杨劲峰, 等 (6023)
遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响	吕晋慧, 王玄, 冯雁梦, 等 (6033)
火干扰对小兴安岭草丛、灌丛沼泽温室气体短期排放的影响	顾韩, 牟长城, 张博文, 等 (6044)
古尔班通古特沙漠南部植物多样性及群落分类	张荣, 刘彤 (6056)
黄土高原樟子松和落叶松与其他树种枯落叶混合分解对土壤的影响	李茜, 刘增文, 米彩红 (6067)
长期集约种植对雷竹林土壤氨氧化古菌群落的影响	秦华, 刘卜榕, 徐秋芳, 等 (6076)
H ₂ O ₂ 参与 AM 真菌与烟草共生过程	刘洪庆, 车永梅, 赵方贵, 等 (6085)
北京山区防护林优势树种分布与环境的的关系	邵方丽, 余新晓, 郑江坤, 等 (6092)
旱直播条件下强弱化感潜力水稻根际微生物的群落结构	熊君, 林辉锋, 李振方, 等 (6100)
不同森林类型根系分布与土壤性质的关系	黄林, 王峰, 周立江, 等 (6110)
臭氧胁迫下硅对大豆抗氧化系统、生物量及产量的影响	战丽杰, 郭立月, 宁堂原, 等 (6120)
垃圾填埋场渗滤液灌溉对土壤理化特征和草本花卉生长的影响	王树芹, 赖娟, 赵秀兰 (6128)
稻麦轮作系统冬小麦农田耕作措施对氧化亚氮排放的影响	郑建初, 张岳芳, 陈留根, 等 (6138)
不同施氮措施对旱作玉米地土壤酶活性及 CO ₂ 排放量的影响	张俊丽, 高明博, 温晚霞, 等 (6147)
北方农牧交错区农业生态系统生产力对气候波动的响应——以准格尔旗为例	孙特生, 李波, 张新时 (6155)
辽宁省能源消费和碳排放与经济增长的关系	康文星, 姚利辉, 何介南, 等 (6168)
基于 FARSITE 模型的丰林自然保护区潜在林火行为空间分布特征	吴志伟, 贺红士, 梁宇, 等 (6176)
不同后作生境对玉米地天敌的冬季保育作用	田耀加, 梁广文, 曾玲, 等 (6187)
云南紫胶虫种群数量对地表蚂蚁多样性的影响	卢志兴, 陈又清, 李巧, 等 (6195)
阿波罗绢蝶种群数量和垂直分布变化及其对气候变暖的响应	于非, 王吟, 王绍坤, 等 (6203)
专论与综述	
海水养殖生态系统健康综合评价: 方法与模式	蒲新明, 傅明珠, 王宗灵, 等 (6210)
海草场生态系统及其修复研究进展	潘金华, 江鑫, 赛珊, 等 (6223)
水华蓝藻对鱼类的营养毒理学效应	董桂芳, 解绶启, 朱晓鸣, 等 (6233)
环境胁迫对海草非结构性碳水化合物储存和转移的影响	江志坚, 黄小平, 张景平 (6242)
生态免疫学研究进展	徐德立, 王德华 (6251)
研究简报	
喀斯特峰丛洼地不同森林表层土壤有机质的空间变异及成因	宋敏, 彭晚霞, 邹冬生, 等 (6259)
准噶尔盆地东南缘梭梭种子雨特征	吕朝燕, 张希明, 刘国军, 等 (6270)



封面图说: 岸边的小白鹭——鹭科白鹭属共有 13 种, 其中有大白鹭、中白鹭、白鹭 (小白鹭)、黄嘴白鹭等, 体羽皆是全白, 世通称白鹭。夏季的白鹭成鸟繁殖时枕部着生两条狭长而软的矛状羽, 状若双辫, 肩和胸着生蓑羽, 冬季时蓑羽常全部脱落, 白鹭虹膜黄色, 嘴黑色, 脚部黑色, 趾呈黄绿色。小白鹭常常栖息于稻田、沼泽、池塘水边, 以及海岸浅滩的红树林里。白天觅食, 好食小鱼、蛙、虾及昆虫等。繁殖期 3—7 月。繁殖时成群, 常和其他鹭类在一起, 雌雄均参加营巢, 次年常到旧巢处重新修葺使用。

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

DOI: 10.5846/stxb201106030748

孙特生, 李波, 张新时. 北方农牧交错区农业生态系统生产力对气候波动的响应——以准格尔旗为例. 生态学报, 2012, 32(19): 6155-6167.

Sun T S, Li B, Zhang X S. The response of agro-ecosystem productivity to climatic fluctuations in the farming-pastoral ecotone of northern China: a case study in Zhunger County. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6155-6167.

北方农牧交错区农业生态系统生产力 对气候波动的响应 ——以准格尔旗为例

孙特生^{1,2}, 李 波^{1,*}, 张新时^{1,3}

(1. 北京师范大学资源学院/地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 西北师范大学社会发展与公共管理学院, 兰州 730070;
3. 中国科学院植物研究所植被数量生态学开放研究实验室, 北京 100093)

摘要: 气候变化对区域生态系统结构和功能有重大影响。以中国北方农牧交错区的准格尔旗为例, 利用气象和《统计年鉴》数据, 采用数理统计方法分析准格尔旗 1961—2009 年降水量、平均气温的波动特征, 计算出该地区 1961—2009 年农业生态系统 NPP 值和主要农作物的气候产量, 论述了准格尔旗农业生态系统生产力对气候波动的响应。结果表明: (1) 降水量和平均气温的年际、年内波动均显著。(2) 准格尔旗农业生态系统生产力呈现阶段性地波动上升趋势。排除社会、科技等影响, 气候生产力对气候波动表现出较强的敏感性, 是作物气候生态适应的结果。(3) 中国北方雨养旱作区, 粮食气候产量受降水量年际波动 (特别是 7、8 月) 显著影响; 谷子、糜黍、玉米、薯类、大豆和油料等农作物的气候产量与降水量年际波动呈显著正相关; 谷子、糜黍的气候产量与生长季降水量年内波动呈显著负相关。集水型生态农业是北方农牧交错区生态环境友好的农业发展模式。(4) 谷子、糜黍、薯类、大豆和油料等农作物的气候产量与 6、7、8 月平均气温年际波动呈显著负相关; 生长季平均气温年内波动对谷子、糜黍、大豆和油料等农作物的气候产量有显著负面影响。因此, 需要综合采取工程、生物和农业措施, 将气候变化对主要农作物气候产量的不利影响降到最低。

关键词: 农业生态系统生产力; 气候波动; 气候产量; 北方农牧交错区

The response of agro-ecosystem productivity to climatic fluctuations in the farming-pastoral ecotone of northern China: a case study in Zhunger County

SUN Tesheng^{1,2}, LI Bo^{1,*}, ZHANG Xinshi^{1,3}

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Resource Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 College of Social Development and Public Administration, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

3 Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Abstract: Global climate change affects the structure and function of regional ecosystems. The response of agro-ecosystem productivity to fluctuations in climate continues to be a worthwhile research topic globally. Precipitation and average temperature during the growing season are the most important meteorological indicators affecting crop climatic yield. In the farming-pastoral ecotone of northern China, the effects of precipitation and temperature are very obvious. The objective of this study is to address two questions: (1) How does climatic fluctuation affect climatic impacts on crop yield? (2) Which crops have significant responses to fluctuations in precipitation or average temperature? Zhunger Counties in Inner Mongolia

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40871135); 国家 973 资助项目 (2007CB106807)

收稿日期: 2011-06-03; **修订日期:** 2012-09-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: libo@bnu.edu.cn

Autonomous Region was selected as a typical region in the farming-pastoral ecotone where the growing season of crops is mainly from May to September. Using long-term observational data collected by the Bureau of Meteorology during 1961—2009 in Dongsheng and Zhunger Counties of Inner Mongolia, and Hequ County of Shanxi Province, we found obvious inter-annual and intra-annual fluctuations in precipitation and average temperature. Net primary productivity (NPP) of agro-ecosystem is a comprehensive indicator reflecting the ability of crops to act as carbon sinks. Statistical Yearbook data, including crop yield and the extent of the area planted during 1961—2009, were used to evaluate NPP of agro-ecosystem using conversion formula. Results showed the rise of NPP had stages of volatility. During the first stage, NPP rose slowly from 1961 to 1981. During the second stage, 1982—1998, NPP rose obviously with the implementation of the household contract responsibility system, promotion of agricultural science and technology, and the application of large amounts of pesticides and fertilizer. The third stage, 1999 to 2009, was varied. During 1999—2001, NPP declined sharply in a period with less precipitation; after 2002, NPP rebounded slowly because some farmland was being converted into forest or grassland. If the effects of human society, science and technology are removed, climatic productivity was very consistent with climatic fluctuations during this time period. Based on crop yield and planting area, we calculated crop yield per unit area. To remove effects of society, science and technology on crop yield, we evaluated crop technological yield (trend yield) using linear or nonlinear models, and calculated crop climatic yield, which obviously reflected changes in crop yield caused by climatic fluctuation. We used SPSS13.0 to quantify the correlation between crop climatic yield and climatic fluctuation. Results showed grain climatic yield was affected by inter-annual fluctuations in precipitation in the semi-arid Loess Plateau of China. These effects were particularly obvious in July and August. Specifically, there was an obvious, positive correlation between crop climatic yield and inter-annual fluctuations in precipitation for millet, broomcorn millet, maize, potatoes, soybeans and oil crops. During the growing season, intra-annual fluctuations of precipitation negatively affected climatic yield of millet and broomcorn millet. So, developing water-harvesting ecological agriculture is very important for efforts to improve the crop response to changing conditions related to water, fertilizer and heat, and for enhancing the stability of agro-ecosystem in the farming-pastoral ecotone of northern China. Similarly, there was an obvious negative correlation between crop climatic yield and inter-annual fluctuations in average temperature for millet, broomcorn millet, potatoes, soybeans and oil crops. During the growing season, the intra-annual fluctuation of average temperature negatively affected climatic yield of millet, broomcorn millet, soybeans and oil crops. Since rainfall and heating occur in the same seasons, and temperatures show an increasing trend in Zhunger County, it is important to select crop varieties with longer growing periods or to take effective protective tillage measures such as using no-till methods with straw cover. In short, the effects of multi-scale climatic fluctuations on productivity were very different for different crops; the effect of monthly-scale changes was the most obvious. In Zhunger County, climatic fluctuations, superimposing natural driving forces and mankind's activities, would obviously affect the sensitive regional ecosystem and aggravate the degradation of land productivity. So, it is very necessary to reduce the adverse effects of climate change on crop yield by taking appropriate engineering, biological and agricultural measures.

Key Words: agro-ecosystem productivity; climatic fluctuations; climatic yield; the farming-pastoral ecotone

全球气候变化及其生态/环境效应已经成为生态学、地球科学和大气科学等领域科学家研究的焦点和热点之一。全球气候变化,区域景观格局、生态过程和服务功能相应改变。对于生态系统生产力的时空变化及其与气候变化的关系,国内外学者利用遥感数据、GIS 手段和统计分析方法开展了大量研究^[1-12]。准格尔旗地处北方农牧交错区,属于生态脆弱区和环境敏感区,受气候变化和人类活动的双重影响,区域生态系统功能随之改变。因此,选择准格尔旗作为研究区,具有较强的典型性,也是理想的研究案例。目前,关于准格尔旗/皇甫川流域的研究主要集中于植物/土壤的生理生态特征^[13-17]、土壤侵蚀或水土保持^[18-24]、土地利用变

化^[25-29]等方面。因此,利用 1961—2009 年准格尔旗及其周边的东胜、河曲县 3 个气象站点数据以及《准格尔旗统计年鉴》(1961—2009 年)中的农业生产数据,分析准格尔旗农业生态系统生产力对气候波动的响应,既是对该地区生态环境特征研究的补充,又可为准格尔旗/皇甫川流域农业生产活动、生态环境治理提供理论参考。

1 研究区概况

准格尔旗位于内蒙古自治区西南部,39°16′—40°20′N 和 110°05′—111°27′E 之间,总面积 7692 km²。准格尔旗属于温带半干旱大陆性气候,年平均气温 6.2—7.2 °C,≥10 °C 积温约 2900—3500 °C。准格尔旗光能资源丰富,日照充足。历年平均降水量在 379—420 mm 之间波动,并集中在夏季,6—8 月降雨量约占总降水量的 61%。年平均蒸发量很大。冬春季风力强盛且频繁,年均风速 2—3 m/s,大风日数 10—30 d。准格尔旗地带性土壤是栗钙土,因受黄土母质影响,还有大面积的黄绵土分布。此外,还广泛分布着风沙土及小面积分布的冲积土等非地带性土壤。准格尔旗植被类型主要有乔、灌、草、农、沙地植被和低湿地植被等。由于气候变化、历史时期的砍伐及自清末以来的农垦,该旗天然林及草原已所剩无几,被人工植被和天然次生草原植被所代替^[30]。当地农民常年种植谷子、糜子、黍、薯类、大豆、小麦、玉米、高粱等粮食作物和花生、胡麻、油菜等油料作物以及甜菜、蔬菜、瓜类等其他农作物。受降水少、低温冷害等气象灾害胁迫,农业生产极其不稳定,农民大多还处于“靠天吃饭”的局面。

2 资料来源与研究方法

2.1 资料来源

本研究使用准格尔旗及其周边的东胜、河曲县 3 个气象站点 1961—2009 年气象数据,分析准格尔旗气候波动变化;使用准格尔旗统计局提供的《统计年鉴》(1961—2009 年)数据,分析其农业生态系统生产力、气候生产力和主要农作物的气候产量。

2.2 气候波动分析方法

为了揭示主要气候要素(降水、气温)变化的内在规律,运用 3 个气象站点数据,采用距平分析方法,从全年、整个生长季(5—9 月)、生长季各月等方面分析准格尔旗 1961—2009 年降水量年际波动和平均气温年际波动;采用变异系数计算方法,从全年各月之间、生长季各月之间两个方面分析准格尔旗 1961—2009 年各年度的降水量年内波动变化,从生长季各月之间来分析各年度的平均气温年内波动变化。

距平计算公式为:

$$p = x - y \quad (1)$$

式中, p 为波动值, x 为要素实际值, y 为样本平均值。

变异系数计算公式为:

$$CV = S/\bar{x} \times 100\% \quad (2)$$

式中, CV 是变异系数, S 为样本标准差, $\bar{x}$ 为样本平均值。

2.3 农业生态系统 NPP 估算方法

根据准格尔旗《统计年鉴》(1961—2009 年)中的农作物播种面积和总产量等数据,估算农业生态系统 NPP,其原理是根据不同作物收获部分的含水量和收获指数(经济产量与作物地上部分干质量的比值),将农业统计数据的产量转换成植被碳储量,转换公式如下^[31-32]:

$$NPP = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i(1 - MC_i) \times 0.45}{HI_i \times 0.9} / \sum_{i=1}^n A_i \quad (3)$$

式中, Y_i 是统计数据中作物 i 的产量, MC_i 是作物收获部分的含水量, HI_i 是作物 i 的收获指数, A_i 是作物收获面积。运用准格尔旗主要种植的 8 大类农作物的产量、播种面积等统计数据,以及作物收获部分的含水量和收获指数(表 1)进行准格尔旗农业生态系统 NPP 的量化。已有研究表明,运用该方法计算的 NPP 与利用 GLO-PEM 模型计算的结果呈极显著相关^[33]。因此,本研究采用此方法计算农业生态系统 NPP,结果是可靠的。

表 1 主要农作物含水量及收获指数^[34-35]

Table 1 Harvest index and water content of major crops					
作物类型 Crop type	含水量 Water content/%	收获指数 Harvest index	作物类型 Crop type	含水量 Water content / %	收获指数 Harvest index
小麦 Wheat	12.5	0.387	谷子 Millet	14.0	0.382
薯类 Potato	80.0	0.600	荞麦 Buckwheat	12.5	0.400
玉米 Maize	13.5	0.433	大豆 Soybean	12.5	0.436
糜黍 Broomcorn millet	13.0	0.415	油料 Oil crops	13.5	0.251

2.4 气候产量(气候生产力)计算方法

为了区分自然和非自然因素对农作物产量的影响,一般把作物产量分解为趋势产量、气候产量和随机误差 3 部分,趋势产量反映历史时期生产力发展水平的长周期产量分量,也被称为技术产量,气候产量是受气候要素为主的短周期变化因子影响的波动产量分量。其中,趋势产量常采用“时间”为自变量进行各种线性或非线性模拟。气候产量的计算公式如下^[36]:

$$Y_w = Y - Y_t - e \tag{4}$$

式中, Y_w 为气候产量, Y 为作物实际产量, Y_t 为技术产量, e 是受随机因素影响的产量分量。因为 e 很小,以下的研究忽略 e 的影响。

为排除各年度播种面积的影响,本研究中粮食实际产量及气候产量、主要农作物实际产量及气候产量均为单位面积产量,单位为 kg/hm^2 。

3 降水 and 气温变化特征分析

3.1 降水量波动

3.1.1 年际

运用准格尔旗及其周边的东胜、河曲县 3 个气象站点降水量数据,采用公式(1),计算出准格尔旗 1961—2009 年全年、生长季和生长季中的 5、6、7、8、9 月的降水量年际波动值,其变化情况(图 1)。

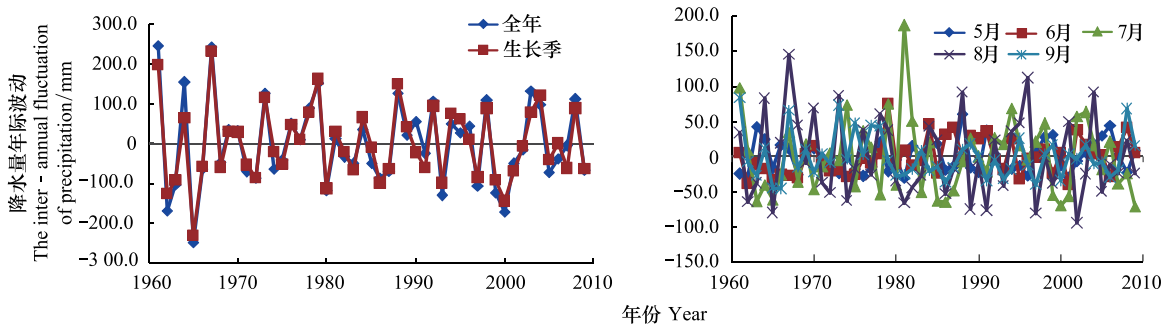


图 1 准格尔旗降水量年际波动(1961—2009 年)

Fig.1 The inter-annual fluctuation of precipitation in Zhunger County (1961—2009)

图 1 显示,从全年和整个生长季来看,降水量年际波动在 20 世纪 60 年代特别显著,70 年代后变得相对缓和,但依然明显。1961—2009 年,全年和生长季两者的降水量年际波动表现出高度的一致性($r=0.960$, $P=0.000<0.001$)。从生长季中的各月来看,降水量年际波动同样显著,相比 5、6、9 月,7、8 月的降水量年际波动更加明显。

3.1.2 年内

准格尔旗属于北方半干旱区,分析降水量年内波动对于农作物气候产量的影响同样重要。运用准格尔旗及其周边的东胜、河曲县 3 个气象站点降水量数据,采用公式(2),计算出准格尔旗 1961—2009 年全年和生长季的降水量变异系数,表征降水量年内波动特征(图 2)。

从图 2 可以看出,1961—2009 年,全年和生长季降水变异系数分别介于 0.87—2.15 和 0.27—1.44 之间,说明降水量年内波动特别显著。就降水量年内波动而言,生长季明显低于全年,但两者波动又表现出高度的一致性($r=0.859, P=0.000<0.001$)。

3.2 平均气温波动

由于全年的平均气温年际波动不显著,也不能较好地反映其对于农作物气候产量的影响,因此本研究着重分析生长季的平均气温年际、年内波动。运用准格尔旗及其周边的东胜、河曲县 3 个气象站点平均气温数据,采用公式(1)、(2),分别计算出准格尔旗 1961—2009 年生长季中各月的平均气温年际波动值和生长季中各月之间的平均气温变异系数(表征平均气温年内波动特征),其变化情况见图 3。

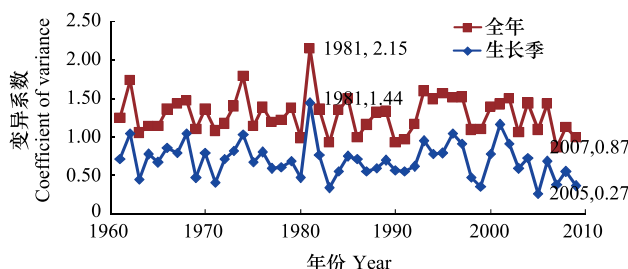


图 2 准格尔旗降水量年内波动(1961—2009 年)

Fig. 2 The intra-annual fluctuation of precipitation in Zhunger County (1961—2009)

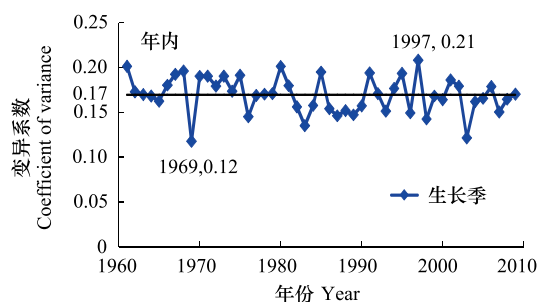
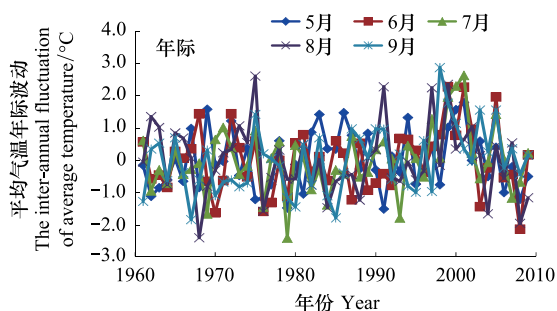


图 3 准格尔旗生长季平均气温波动(1961—2009 年)

Fig. 3 The fluctuation of average temperature during the growing season in Zhunger County (1961—2009)

图 3 显示,1961—2009 年,生长季中的 7、8 和 9 月平均气温年际波动较为明显;平均气温变异系数在 0.17 上下波动,1997 年最大为 0.21,1969 年最小为 0.12,表明生长季平均气温年内波动亦明显。

4 农业生态系统生产力对气候波动的响应

4.1 农业生态系统 NPP 对气候波动的综合响应

运用准格尔旗统计年鉴(1961—2009 年)中的农业生产数据,利用公式(3)和表 1 数据计算出准格尔旗农业生态系统 NPP 系列值,再利用公式(4)采用指数拟合模型剥离出技术产量,得到该地区 1961—2009 年的气候生产力,两者的变化情况见图 4。

图 4 显示,准格尔旗农业生态系统 NPP 呈现明显的波动上升趋势,大致可划分为 3 个阶段:1961—1981 年,缓慢增长;1982—1998 年,受家庭联产承包责任制的农业政策、农业科技水平的提升和大量农药、化肥的施用等因素影响,农业生态系统 NPP 明显增长;1999—2001 年,受极端干旱气候影响,农业生态系统 NPP 急剧降低,2002 年后有所回升,但受国家退耕还林还草政策影响,增长趋势放缓。这说明,受社会、科技和自然等因素的综合影响,准格尔旗农业生态系统 NPP 变化明显,在有些年份气候条件对其有决定性的影响。图 4 还显示,与农业生态系统 NPP 一样,气候生产力也呈波动性变化,80 年代以后这种变化更加明显。

农业生态系统是一种受人类强烈干预的人为控制系统,也是自我调节机制较为薄弱的生物系统,是全球变化的主要承受者^[37]。植被净初级生产力 NPP,是度量植物生产能力的重要指标之一。对于干旱、半干旱地区,国内应用较多的植被 NPP 计量模型是周广胜、张新时根据水热平衡联系方程及植物的生理生态特点建立的自然植被净第一性生产力模型^[38],它能较综合地反映降水、气温、日照和风等气候因子对植被净初级生产力的影响。本研究尝试运用 SPSS13.0 对农业生态系统气候生产力与植被净初级生产力 NPP(图 5,计

算过程及结果略)进行相关性分析,相关系数为 0.393,在 0.01 水平上显著相关。这说明农业生态系统气候生产力对气候波动同样表现出较强的敏感性。

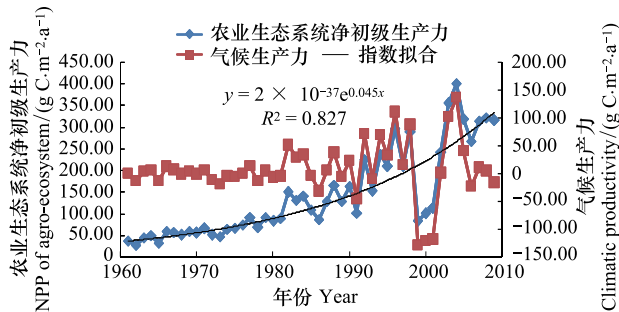


图4 准格尔旗农业生态系统 NPP 和气候生产力变化 (1961—2009 年)

Fig.4 The NPP and climatic productivity of agro-ecosystem in Zhunger County (1961—2009)

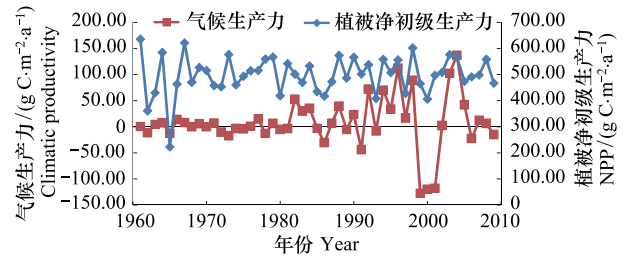


图5 准格尔旗农业生态系统气候生产力、植被净初级生产力波动变化 (1961—2009 年)

Fig.5 The fluctuation of NPP, climatic productivity of agro-ecosystem in Zhunger County (1961—2009)

4.2 农作物气候产量对气候波动的响应

4.2.1 农作物气候产量

气候产量在一定程度上反映出受气候波动影响,陆地人工生态系统的气候生产力水平。运用准格尔旗统计年鉴(1961—2009 年)中的农业生产数据,首先计算出粮食作物^①和主要农作物的单位面积产量,再采用公式(4)计算出各自对应的气候产量。本研究中,粮食、谷子、糜黍、大豆的技术产量采用二次多项式拟合计算;小麦、玉米和油料作物的技术产量采用指数曲线拟合计算;薯类的技术产量采用最小二乘法经线性拟合计算。粮食及农作物气候产量的变化情况详见图 6。

图 6 显示如下特点:(1)1961—1981 年,粮食及主要农作物实际产量在波动中缓慢增长;(2)1982—1998 年,受家庭联产承包责任制的农业政策、农业科技水平的提升和大量农药、化肥的施用等因素影响,粮食及主要农作物实际产量均明显增长;(3)受极端干旱气候影响,1999—2001 年粮食及主要农作物实际产量均急剧降低,2002 年后有所回升,但受国家退耕还林还草政策影响,增长趋势放缓;(4)与实际产量相比,气候产量的波动亦明显,但趋势不显著。

4.2.2 气候产量与降水量波动的关系

运用 SPSS13.0 对粮食及主要农作物气候产量与不同时间段的降水量年际波动进行相关性分析,运行结果见表 2。

表2 气候产量与降水量年际波动的相关性

Table 2 The correlation between climatic yield and inter-annual fluctuation of precipitation

降水量年际波动 The inter-annual fluctuation of precipitation	气候产量 Climatic yield							
	粮食 Grain	小麦 Wheat	谷子 Millet	糜黍 Broomcorn millet	玉米 Maize	薯类 Potato	大豆 Soybean	油料 Oil crops
全年 The whole year	0.458 **	—	0.380 **	0.361 *	0.394 **	0.375 **	0.340 *	0.354 *
生长季 The growing season	0.459 **	—	0.313 *	0.335 *	0.417 **	0.381 **	0.305 *	0.321 *
5 月 May	—	—	—	—	—	—	—	—
6 月 June	—	—	—	—	—	—	—	0.332 *
7 月 July	0.348 *	—	—	—	0.351 *	—	—	—
8 月 August	0.282 *	—	—	—	—	—	—	—
9 月 September	—	—	—	—	—	—	—	—

* 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关;—表示相关性不显著

① 本论文分析粮食气候产量,目的是从整体上反应粮食作物对降水量、平均气温波动的响应

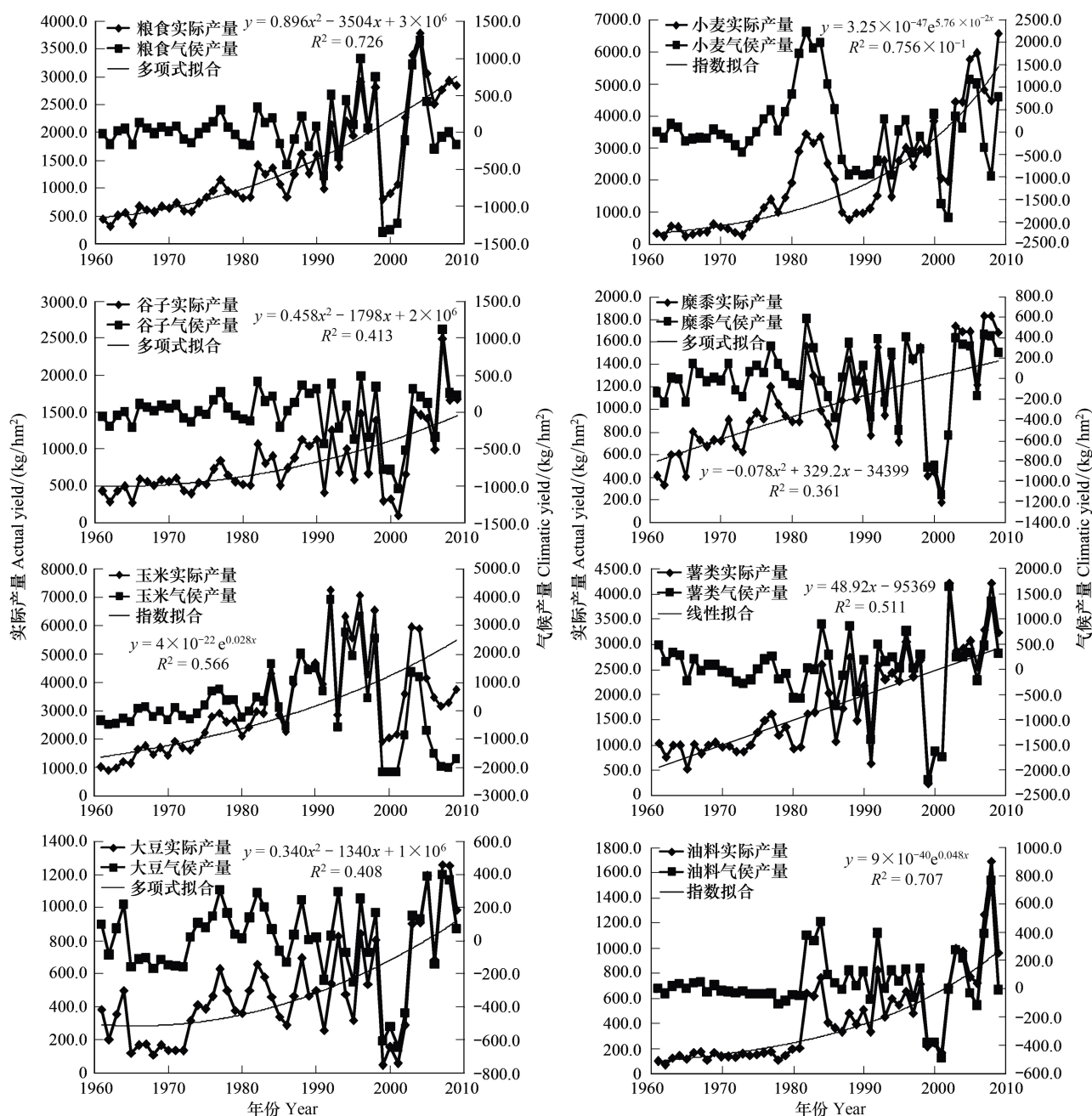


图6 粮食及主要农作物的实际产量、气候产量变化(1961—2009年)

Fig. 6 The actual and climatic yield of grain and major crops(1961—2009)

从表2可以看出,除小麦外,粮食及农作物的气候产量均与全年、整个生长季降水量年际波动存在不同程度的正相关,说明全年、生长季降水量增加,粮食及主要农作物气候产量相应增加;反之则减少。总体上,粮食作物气候产量与7、8月降水量年际波动呈显著正相关,说明7、8月降水量丰缺显著影响粮食气候产量的高低;玉米气候产量受7月降水量年际波动显著影响;油料作物气候产量对6月降水量年际波动较为敏感。

同理,运用SPSS13.0对粮食及主要农作物气候产量与全年、生长季降水量年内波动进行相关性分析,运行结果见表3。

从表3可知,从全年来看,谷子气候产量与降水量年内波动呈显著负相关,说明全年降水变异系数越大,降水量在年内分配越不均,越不利于谷子生长发育,其气候产量可能降低,造成减产;反之,谷子气候产量增加。从生长季来看,谷子、糜黍气候产量与降水量年内波动呈显著负相关,说明生长季降水变异系数越大,降

水量在生长季内分配越不均,越不利于谷子、糜黍生长发育,其气候产量可能降低,造成减产;反之,谷子、糜黍气候产量增加。

表 3 气候产量与降水量年内波动的相关性
Table 3 The correlation between climatic yield and intra-annual fluctuation of precipitation

降水量年内波动 The intra-annual fluctuation of precipitation	气候产量 Climatic yield							
	粮食 Grain	小麦 Wheat	谷子 Millet	糜黍 Broomcorn millet	玉米 Maize	薯类 Potato	大豆 Soybean	油料 Oil crops
全年 The whole year	—	—	-0.301 *	—	—	—	—	—
生长季 The growing season	—	—	-0.324 *	-0.288 *	—	—	—	—

* 表示在 0.05 水平上显著相关;—表示相关性不显著

4.2.3 气候产量与平均气温波动的关系

运用 SPSS13.0 对粮食及主要农作物气候产量与 5、6、7、8 和 9 月的平均气温年际波动分别进行相关性分析,运行结果见表 4。

表 4 气候产量与平均气温年际波动的相关性
Table 4 The correlation between climatic yield and inter-annual fluctuation of average temperature

平均气温年际波动 The inter-annual fluctuation of average temperature	气候产量 Climatic yield							
	粮食 Grain	小麦 Wheat	谷子 Millet	糜黍 Broomcorn millet	玉米 Maize	薯类 Potato	大豆 Soybean	油料 Oil crops
5 月 May	—	—	—	—	—	-0.327 *	-0.332 *	—
6 月 June	-0.386 **	—	-0.508 **	-0.482 **	—	-0.382 **	-0.432 **	-0.501 **
7 月 July	-0.418 **	—	-0.537 **	-0.438 **	—	-0.529 **	-0.542 **	-0.545 **
8 月 August	-0.365 **	—	-0.403 **	-0.334 *	—	-0.425 **	-0.361 *	-0.441 **
9 月 September	—	—	—	—	—	—	—	—

* 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关;—表示相关性不显著

表 4 显示,总体上,粮食及主要农作物气候产量与平均气温年际波动间均呈显著负相关,说明生长季平均气温年际波动越大,超出作物不同生育时期的最适温度,就不利于作物生长发育,作物气候产量可能降低,造成减产;生长季平均气温年际波动越小,对作物生长发育影响越小,作物气候产量稳定性越强。其中,5 月平均气温年际波动对薯类、大豆气候产量有显著影响;6、7、8 月平均气温年际波动对除小麦、玉米外的农作物气候产量影响显著。

同理,运用 SPSS13.0 对粮食及主要农作物气候产量与整个生长季平均气温年内波动进行相关性分析,运行结果见表 5。

表 5 气候产量与平均气温年内波动的相关性
Table 5 The correlation between climatic yield and intra-annual fluctuation of average temperature

平均气温年内波动 The intra-annual fluctuation of average temperature	气候产量 Climatic yield							
	粮食 Grain	小麦 Wheat	谷子 Millet	糜黍 Broomcorn millet	玉米 Maize	薯类 Potato	大豆 Soybean	油料 Oil crops
生长季 The growing season	—	—	-0.442 **	-0.293 *	—	—	-0.361 *	-0.351 *

* 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关;—表示相关性不显著

从表 5 可以看出,生长季平均气温年内波动,显著影响谷子、糜黍、大豆和油料作物的气候产量;这种波动越大,超出作物不同生育时期的最适温度和耐受极限,就不利于作物生长发育,作物气候产量可能会降低,造成减产,反之则稳产甚至增产。

5 结论与讨论

北方农牧交错区农业生态系统是一个生态-经济-社会复合巨系统,农业生态系统生产力受到自然条件、

国家政策和科技水平等的综合影响,其中气候变化对农牧交错区生态系统功能有显著影响^[39-42]。本研究以农牧交错区的准格尔旗为典型案例,分析农业生态系统生产力对气候波动的响应,结果表明:

(1)准格尔旗降水量年际、年内波动均特别显著;平均气温年际波动在7、8和9月较为明显,年内波动亦显著。其中,全年和生长季降水量年际波动特别显著且高度一致,生长季各月份的降水量年际波动同样显著,7、8月尤其明显;全年和生长季降水量年内波动也特别显著。北方农牧交错区降水量、平均气温的波动性变化,叠加上气候暖干化趋势,必将对区域农业生态系统粮食作物的生长发育、品种熟性、种植区域与面积、产量与品质产生重大影响^[43]。

(2)准格尔旗农业生态系统生产力呈现明显的波动上升趋势,大致划分为3个阶段:1961—1981年,缓慢增长;1982—1998年,受家庭联产承包责任制的农业政策、农业科技水平的提升和大量农药、化肥的施用等因素影响,农业生态系统生产力快速增长;1999—2001年,受极端干旱气候影响,农业生态系统生产力急剧降低(可表征作物群体动态特征),2002年后有所回升,但受国家退耕还林还草政策影响,增长趋势放缓。排除社会、科技等因素,农业生态系统气候生产力波动性变化,并对气候波动表现出较强的敏感性,是作物气候生态适应性的结果。

(3)谷子、糜黍、玉米、薯类、大豆和油料等农作物的气候产量与全年、生长季降水量年际波动均存在不同程度的正相关,特别是7、8月降水量年际波动显著影响粮食气候产量。其中,玉米气候产量受7月降水量年际波动显著影响;油料作物气候产量对6月降水量年际波动较为敏感。这是因为7月正值玉米抽穗、开花期;而6月是油料作物(如花生)的开花结荚期,需水量最多。从全年来看,谷子气候产量与降水量年内波动呈显著负相关;从生长季来看,谷子、糜黍气候产量与降水量年内波动呈显著负相关。谷子是耐旱作物,一生需水规律为“早期宜早、中期宜湿、后期怕涝”。因此,无论是全年还是生长季,降水的不合时宜,都将明显影响谷子的气候产量。

准格尔旗属于典型的半干旱雨养农业区,该地区干旱出现频率高,持续时间长,影响范围广,并具有跨季节和跨年度的特征,农作物容易遭受水分胁迫而减产。这是由于在干旱和半干旱环境条件下,降水格局的变化对农作物生理生态机理的影响甚至超过了CO₂浓度和温度升高单一因子或两者共同作用的影响^[44];降水决定农牧交错带位置及其气候生产力的关键因素,未来干热的气候趋势有可能使该地区的环境状况变得更为严峻^[42]。降水量年际变化、年内分配格局仍然是影响准格尔旗农业生产和农业生态系统稳定性的最重要因素。就生产等量的干物质而言,多数C₃作物需水量大于C₄作物;禾谷类作物的孕穗期,对缺水最为敏感,此期缺水,对生长发育极为不利,常造成大幅度减产^[45]。同时,光热资源增加必然增大作物田间蒸散量,再叠加降水量减少的可能,黄土高原干旱风险程度将可能增大^[46]。因此,针对该地区降水波动特征,需要加强田间垄沟集水、地膜覆盖、抗旱剂、抗旱品种、集雨补灌等节水技术的技术组合研究^[47]和SPAC系统理论在半干旱区节水农业中的应用研究,发展集水型生态农业^[48],改善水肥热条件,维持土壤有机质动态平衡,降低干旱灾害风险,增强农业生态系统稳定性。

(4)5月平均气温年际波动对薯类、大豆气候产量有显著负面影响。对于马铃薯而言,薯块形成后期以17—18℃最为适宜;对于大豆来说,出苗至开花日数受温度所左右,低于17℃开花大为推迟。从1961—2009年,准格尔旗5月的多年平均气温约为17℃,因而5月平均气温的年际波动对马铃薯、大豆的气候产量有显著影响。除小麦、玉米外,谷子、糜黍、薯类、大豆和油料等农作物的气候产量与6、7、8月平均气温年际波动呈显著负相关;生长季平均气温年内波动对谷子、糜黍、大豆和油料等农作物的气候产量有显著负面影响。小麦生育期中的抽穗期、开花期和灌浆-黄熟旗的最适温度对应为13—20℃、18—24℃和18—22℃;玉米在籽粒灌浆成熟时期要求日平均温度保持在20—24℃,有利于有机物质合成和向果穗籽粒运转^[45]。从1961—2009年,准格尔旗6、7、8月的多年平均气温分别为21.4、23.3、21.3℃,基本符合小麦、玉米关键生育期对温度的要求,因而两者的气候产量对6、7、8月平均气温年际波动不敏感。

准格尔旗生长季平均气温波动和气候变暖可能还会带来农业气象灾害。这是由于气温升高,大气层中气

流交换增强,大风天气会增加,风暴频率和强度都会有所增强,风蚀作用增强导致水土流失会加剧,从而影响农业生产。多数学者认为温度升高(尤其是非对称性增温^[49])将对作物产量起到负效应^[50-53]。作物种或品种的不同生育时期,三基点温度都是不同的,由于生长季平均气温的年际或年内波动,当温度超出作物不同生育时期的最适温度和耐受极限,作物生长发育将受到显著影响。最新研究认为温度对某些作物产量影响是非线性的,当温度高于关键温度后其产量会迅速下降^[54]。该地区种植的春小麦、马铃薯为喜冷凉作物,容易出现高温逼熟现象。此外,低温往往限制某些病虫害的分布范围,气温升高后,这些病虫害的分布区可能扩大,从而影响农作物生长,比如马铃薯会因病虫害而损失产量15%左右^[55]。因此,针对准格尔旗雨热同期的气候特征,结合气温升高趋势,一方面可以有选择地引进种植一些生育期较长的作物品种^[56],另一方面可采取有效的保护性耕作措施,如免耕秸秆覆盖处理对土壤温度起到“降温效应”,而传统耕作地膜覆盖、免耕地膜覆盖处理能阻止夜间土壤温度的回落,有显著的“保温作用”^[57]。

(5)农业生态系统气候生产力的波动性变化,是气候因子波动性变化的反映,也是区域生态系统结构、功能变化的表征。降水、气温、日照、风等气候要素既作为生态因子影响农业生态系统生产力,又作为自然资本参与到农业生态系统物质循环、能量流动中。农业生态系统与自然生态系统最本质的区别就在于物质和能量被大量移出,因而用于维持和修复系统的质能很少,这是造成生态脆弱区环境恶化的根源^[58]。准格尔旗波动性的气候特征叠加上的自然驱动力和人类活动力,必将对准该区域脆弱的生态系统结构、功能产生重要影响,并加剧土地生产力退化。因此,在准格尔旗生态环境建设过程中,要维护巩固水土保持工程措施,大力推广实施以种植喜温、耐干旱植物为主的生物措施,依靠科技水平改进农业措施,将气候波动对农业生态系统生产力的不利影响降到最低。

References:

- [1] Zhao M S, Steven W R. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 2010, 329 (5994): 940-943.
- [2] Liu J S, Xu X, Zhang Y, Tian Y Q, Gao Q. Effect of rainfall interannual variability on the biomass and soil water distribution in a semiarid shrub community. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(6): 729-737.
- [3] Wang T M, Kou X J, Xiong Y C, Mou P, Wu J G, Ge J P. Temporal and spatial patterns of NDVI and their relationship to precipitation in the Loess Plateau of China. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(7): 1943-1958.
- [4] Li X B, Shi P J. Sensitivity analysis of variation in NDVI, temperature and precipitation in typical vegetation types across China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(3): 379-382.
- [5] Sun R, Zhu Q J. Distribution and seasonal change of net primary productivity in China from April, 1992 to March, 1993. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1): 36-45.
- [6] Guo X Y, He Y, Shen Y P, Feng D. Analysis of the terrestrial NPP based on the MODIS in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers from 2000 to 2004. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 512-518.
- [7] He Y, Dong W J, Ji J J, Dan L. The net primary production simulation of terrestrial ecosystems in China by AVIM. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(3): 345-349.
- [8] Zhang H L. The Feature Analysis on China's Terrestrial NPP Spatial-Temporal Change in Recent Five Years [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2006.
- [9] Zhu W Q, Pan Y Z, Long Z H, Chen Y H, Li J, Hu H B. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation based on GIS and RS: a case study in Inner Mongolia, China. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(3): 300-307.
- [10] He Y, Dong W J, Guo X Y, Dan L. The terrestrial growth and its relationship with climate in China based on the MODIS data. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5086-5092.
- [11] Xu H M, Gao Q Z, Huang Y M, Jia H K. Simulated the impact of climate change on net primary production in hilly area of Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2939-2947.
- [12] Meng J J, Wang J. The response of vegetation dynamics to climate change in the southwestern Karst region of China since the early 1980s. *Geographical Research*, 2007, 26(5): 857-866.
- [13] Guo W H, Li B, Huang Y M, Zhao H X, Zhang X S. Effects of different water stresses on eco-physiological characteristics of *Hippophae*

- rhamnoides* seedlings. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(10): 1238-1244.
- [14] Yang J, Cao Y, Li G Q, Song B Y. Water use of *thymus serpyllum* and *Hippophae rhamnoides* communities in Huangfuchuan. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(2): 241-246.
- [15] Song B Y, Yang J, Guo G F, Zhang P. Physio-ecological use of water of artificial poplar forest land in Huangfuchuan basin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 159-162.
- [16] Cao Y, Yang J, Li G Q. A study on the water regime of artificial vegetation *astragalus adsurgens pall. cv.* in Huangfuchuan watershed. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis NeiMongol*, 2002, 33(4): 439-442.
- [17] Yu H B, Yang J, Bao T J. Estimation of evapotranspiration over Huangfuchuan watershed using remote sensing. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(1): 102-105, 114-114.
- [18] Zhao H X. The principles of soil erosion in Huangfuchuan watershed valley-Application on model of soil erosion of small watershed. *Research of Soil and Water Conservation*, 1998, 5(3): 101-105.
- [19] Wang Z W, Miao F Q, Zhao X. The forecast model of soil erosion of small valley in Huangfu brook let watershed. *Inner Mongolia Science Technology and Economy*, 2002, (4): 89-90.
- [20] Zhu Q W, Yao W Y, Ru Y Y. Study on comprehensive management of Huangfuchuan River basin in variation effect of river channel erosion and deposition. *Soil and Water Conservation in China*, 2003, (5): 24-26.
- [21] Yao W Y, Ru Y Y, Kang L L. Effect of flood retention and sediment reduction with different allocation system of water and soil conservation measures. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(2): 28-31.
- [22] Yu F, Li X B, Chen Y H, Wang H, Yang M C. Land use change and soil erosion evaluation in Huangfuchuan watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1947-1956.
- [23] Xu H M, Gao Q Z, Jiang Y. Scenario analysis of soil erosion in the Feldspathic Sandstone area in the middle reaches of the Yellow River. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(1): 10-14.
- [24] Miao Z Y, Chen Z X, Zhao B X. Research on water and soil conservation and livestock development in Huangpuchuan watershed—an analysis of the relationship of conservation effects and livestock development in Wufendi small watershed in Zhunger banner of Inner Mongolia. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1991, 11(5): 10-16.
- [25] Yu F, Li X B, Wang H, Yu H J. Land use change and eco-security assessment of Huangfuchuan watershed. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(6): 645-653.
- [26] Gao Q Z, Jiang Y. An analysis of land-use change in Changchuan watershed, a soft sand-rock area at the middle reach of Yellow River. *Progress in Geography*, 2004, 23(4): 52-63.
- [27] Zhang C, Li X B, Zhang L, Huang L M, Yu F. Impacts of land use and cover change on ecosystem service values in Huangfuchuan watershed. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2009, 45(4): 399-404.
- [28] Xia Q M. Study on Dynamic Change of Land Use of Dalu Town in Zhunger County [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008.
- [29] Li Z F. Research on Land Use Change and Sustainable Use Model in Zhungeer County [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2002.
- [30] Jin Z P, Shi P J, Hou F C, Zhao H X. Soil erosion system model and control pattern of Huangfuchuan Watershed in Yellow River. Beijing: Oceanic Press, 1992: 18-18.
- [31] Lobell D B, Hicke J A, Asner G P, Field C B, Tucker C J, Los S O. Satellite estimates of productivity and light use efficiency in United States agriculture, 1982-1998. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 722-735.
- [32] Su B Y, Zhang L, Chen S B, Wang B X, Jiang G M. The spatial and temporal patterns of net primary productivity and its impact factors in regional agro-ecosystem; a case study in Shandong province. *Ecology and Environment*, 2010, 19(9): 2036-2041.
- [33] Yan H M, Liu J Y, Cao M K. Spatial pattern and topographic control of China's agricultural productivity variability. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(2): 171-180.
- [34] Zhang F C, Zhu Z H. Harvest index for various crops in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 1990, 23(2): 83-87.
- [35] Pan X H, Deng Q H. Review on crop harvest index. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2007, 29(1): 1-5.
- [36] Wang F T. Introduction to Agricultural Weather Forecast. Beijing: Agricultural Press, 1991: 432-444.
- [37] Yu G R. Global Change, Carbon Cycle and Storage in Terrestrial Ecosystem. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 57-57.
- [38] Zhou G S, Zhang X S. A natural vegetation NPP model. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, 19(3): 193-200.
- [39] Sun M, Xu Z, Liu J L. Response of grassland climate productivity to climate change in farming-pastoral area of Inner Mongolia. *Pratacultural Science*, 2011, 28(6): 1085-1090.
- [40] Gao Z Q, Liu J Y, Cao M K, Li K R, Tao B. The impacts of land use and climate change to pastoral transition zone ecosystem productivity and carbon cycle. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2004, 34(10): 946-957.

- [41] Jin Y H. Study on Ecological Optimization of Farming System in the Farming-Pastoral Zone of the Songnen Plain under Global Climate Change [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2010.
- [42] Qiu G W, Zhao Y X, Wang S L. The impacts of climate change on the interlock area of farming-pastoral region and its climatic potential productivity in northern China. *Arid Zone Research*, 2001, 18(1): 23-28.
- [43] Deng Z Y, Wang Q, Zhang Q, Qing J Z, Yang Q G, Yuan Z P, Liu W J, Xu J F. Impact of climate warming and drying on food crops in northern China and the countermeasures. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22): 6278-6288.
- [44] Sun H Y, Liu C M, Wang Z H, Zhang X Y, Dong B F. Changing trend of precipitation and its effects on crop productivity in the piedmont of Taihang Mountain. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(6): 18-21.
- [45] The Editorial Committee of China Agriculture Encyclopedia. *China Agriculture Encyclopedia (Agro-meteorology)*, Beijing: Agricultural Press, 1986: 336, 358, 401.
- [46] E Y H, Shi Q, Ma Y P, Guo J P, Xiao Z L. The impacts of future climatic change on agricultures and eco-environment of Loess Plateau in next decade. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5542-5552.
- [47] Xiao G J, Zhang Q, Xiong Y C, Lin M Z, Wang J. Integrating rainwater harvesting with supplemental irrigation into rain-fed spring wheat farming. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93(2): 429-437.
- [48] Li F M. Sustainable agro-ecosystem design principles and practice on the semi-arid Loess Plateau of China // Wu J G, Yang J. *Lectures in Modern Ecology (IV) Theory and Applications*. Beijing: Higher Education Press, 2009: 368-368.
- [49] Tan K Y, Fang S B, Ren S X, Zhang X S. Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature in global warming and its effects on agriculture ecosystems. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(5): 634-641.
- [50] Schiermeier Q. Climate change offers bleak future. *Nature News*, 2001, 409(6823): 971-971.
- [51] Hopkin M. Climate takes aim. *Nature*, 2007, 446(7137): 706-707.
- [52] Krishnan P, Swain D K, Bhaskar B C, Nayak S K, Dash R N. Impact of elevated CO₂ and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 122(2): 233-242.
- [53] Lobell D B, Field C B. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2007, 2(1), doi: 10.1088/1748-9326/2/1/014002.
- [54] Scelenker W, Roberts M J. Nonlinear effects of weather on corn yields. *Review of Agricultural Economics*, 2006, 28(3): 391-398.
- [55] Zhang J T, Li S Q. *The Application Ecology*. Beijing: Science Press, 2003: 534-534.
- [56] Su Y H, Pan X B. Study on the agrilclimate features in Zhungeer country in Inner Mongolia. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(3): 85-89.
- [57] Cai L Q. Studies on the Soil Water Transport Characters in Soil-Plant-Atmosphere Continuum System under Different Conservation Tillage in Dryland of Loess Plateau [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2009.
- [58] Odum E P. *Basic Ecology*. Philadelphia: Saunders College Publishing, 1983: 487-498.

参考文献:

- [4] 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 379-382.
- [5] 孙睿, 朱启疆. 中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究. *地理学报*, 2000, 55(1): 36-45.
- [6] 郭晓寅, 何勇, 沈永平, 冯丁. 基于 MODIS 资料的 2000—2004 年江河源区陆地植被净初级生产力分析. *冰川冻土*, 2006, 28(4): 512-518.
- [7] 何勇, 董文杰, 季劲均, 丹利. 基于 AVIM 的中国陆地生态系统净初级生产力模拟. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 345-349.
- [8] 张海龙. 近五年来中国陆地植被净第一性生产力时空变化特征分析 [D]. 南京: 南京师范大学, 2006.
- [9] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 陈云浩, 李京, 扈海波. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算—以中国内蒙古为例. *遥感学报*, 2005, 9(3): 300-307.
- [10] 何勇, 董文杰, 郭晓寅, 丹利. 基于 MODIS 的中国陆地植被生长及其与气候的关系. *生态学报*, 2007, 27(12): 5086-5092.
- [11] 许红梅, 高清竹, 黄永梅, 贾海坤. 气候变化对黄土丘陵沟壑区植被净第一性生产力的影响模拟. *生态学报*, 2006, 26(9): 2939-2947.
- [12] 蒙古军, 王钧. 20 世纪 80 年代以来西南喀斯特地区植被变化对气候变化的响应. *地理研究*, 2007, 26(5): 857-866.
- [14] 杨劼, 曹云, 李国强, 宋炳煜. 皇甫川流域百里香草原和人工沙棘灌木林的水分利用特征. *地球科学进展*, 2002, 17(2): 241-246.
- [15] 宋炳煜, 杨劼, 郭广芬, 张屏. 皇甫川流域人工杨树林地的生理生态用水. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 159-162.
- [16] 曹云, 杨劼, 李国强. 皇甫川流域人工植被沙打旺水分状况研究. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 2002, 33(4): 439-442.
- [17] 于红博, 杨劼, 包铁军. 应用遥感方法估算皇甫川流域蒸散(发)量. *水土保持通报*, 2008, 28(1): 102-105, 114-114.
- [18] 赵焕勋. 对皇甫川流域土壤侵蚀规律的再认识——小流域土壤侵蚀估算模型的应用. *水土保持研究*, 1998, 5(3): 101-105.

- [19] 王正文, 苗风清, 赵昕. 皇甫川流域小流域地块土壤侵蚀预报模型. 内蒙古科技与经济, 2002, (4): 89-90.
- [20] 朱岐武, 姚文艺, 茹玉英. 皇甫川流域综合治理对河道冲淤变化影响的研究. 中国水土保持, 2003, (5): 24-26.
- [21] 姚文艺, 茹玉英, 康玲玲. 水土保持措施不同配置体系的滞洪减沙效应. 水土保持学报, 2004, 18(2): 28-31.
- [22] 喻锋, 李晓兵, 陈云浩, 王宏, 杨明川. 皇甫川流域土地利用变化与土壤侵蚀评价. 生态学报, 2006, 26(6): 1947-1956.
- [23] 许红梅, 高清竹, 江源. 黄河中游砒砂岩地区长川流域土壤侵蚀情景分析. 生态与农村环境学报, 2008, 24(1): 10-14.
- [24] 苗宗义, 陈正新, 赵秉秀. 皇甫川流域水土保持与畜牧业发展的研究——内蒙准格尔旗五分地沟小流域水保效益与发展畜牧业关系的分析. 水土保持通报, 1991, 11(5): 10-16.
- [25] 喻锋, 李晓兵, 王宏, 余弘婧. 皇甫川流域土地利用变化与生态安全评价. 地理学报, 2006, 61(6): 645-653.
- [26] 高清竹, 江源. 黄河中游砒砂岩地区长川流域土地利用变化分析. 地理科学进展, 2004, 23(4): 52-63.
- [27] 张程, 李晓兵, 张立, 黄玲梅, 喻锋. 皇甫川流域土地利用/覆盖变化对生态服务价值的影响. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2009, 45(4): 399-404.
- [28] 夏庆梅. 准格尔旗大路镇土地利用动态变化研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- [29] 李忠锋. 准格尔旗土地利用变化与持续利用模式研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2002.
- [30] 金争平, 史培军, 候福昌, 赵焕勋. 黄河皇甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式. 北京: 海洋出版社, 1992: 18-18.
- [32] 苏本营, 张璐, 陈圣宾, 王冰雪, 蒋高明. 区域农田生态系统生产力的时空格局及其影响因子研究——以山东省为例. 生态环境学报, 2010, 19(9): 2036-2041.
- [33] 闫惠敏, 刘纪远, 曹明奎. 中国农田生产力变化的空间格局及地形控制作用. 地理学报, 2007, 62(2): 171-180.
- [34] 张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数. 中国农业科学, 1990, 23(2): 83-87.
- [35] 潘晓华, 邓强辉. 作物收获指数的研究进展. 江西农业大学学报, 2007, 29(1): 1-5.
- [36] 王馥棠. 农业气象预报概论. 北京: 农业出版社, 1991: 432-444.
- [37] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 北京: 气象出版社, 2003: 57-57.
- [38] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探. 植物生态学报, 1995, 19(3): 193-200.
- [39] 孙森, 徐柱, 柳剑丽. 内蒙古农牧交错区草地气候生产力对气候变化的响应. 草业科学, 2011, 28(6): 1085-1090.
- [40] 高志强, 刘纪远, 曹明奎, 李克让, 陶波. 土地利用和气候变化对农牧过渡区生态系统生产力和碳循环的影响. 中国科学 (D 辑): 地球科学, 2004, 34(10): 946-957.
- [41] 靳英华. 全球气候变化下的松嫩平原农牧交错区农田耕作生态优化研究 [D]. 长春: 东北师范大学, 2010.
- [42] 裘国旺, 赵艳霞, 王石立. 气候变化对我国北方农牧交错带及其气候生产力的影响. 干旱区研究, 2001, 18(1): 23-28.
- [43] 邓振镛, 王强, 张强, 倾继祖, 杨启国, 袁志鹏, 刘文婧, 徐金芳. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施. 生态学报, 2010, 30(22): 6278-6288.
- [44] 孙宏勇, 刘昌明, 王振华, 张喜英, 董博飞. 太行山前平原近 40 年降水的变化趋势及其对作物生产的影响. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 18-21.
- [45] 中国农业百科全书总编辑委员会. 中国农业百科全书(农业气象卷). 北京: 农业出版社, 1986: 336, 358, 401.
- [46] 俄有浩, 施茜, 马玉平, 郭建平, 肖正璐. 未来 10 年黄土高原气候变化对农业和生态环境的影响. 生态学报, 2011, 31(19): 5542-5552.
- [48] 李凤民. 半干旱黄土高原可持续农业生态系统设计原理和实践 // 郭建国, 杨劼. 现代生态学讲座(IV 理论与实践). 北京: 高等教育出版社, 2009: 368-368.
- [49] 谭凯炎, 房世波, 任三学, 张新时. 非对称性增温对农业生态系统影响研究进展. 应用气象学报, 2009, 20(5): 634-641.
- [55] 张金屯, 李素清. 应用生态学. 北京: 科学出版社, 2003: 534-534.
- [56] 苏艳华, 潘学标. 内蒙古准格尔旗农业气候变化特征分析. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3): 85-89.
- [57] 蔡立群. 不同保护性耕作措施对黄土高原旱地农田 SPAC 系统中水分运移特性的影响研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2009.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 19 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Assessment of monitoring methods for population abundance of Amur tiger in Northeast China	5943
..... ZHANG Changzhi, ZHANG Minghai, JIANG Guangshun (5943)	
Changes of residents nitrogen consumption and its environmental loading from food in Xiamen	5953
..... YU Yang, CUI Shenghui, ZHAO Shengnan, et al (5953)	
Analysis of the meiobenthic community in the Pearl River Estuary in summer	5962
..... YUAN Qiaojun, MIAO Suying, LI Hengxiang, et al (5962)	
Community characteristics of phytoplankton in the coastal area of Leizhou Peninsula and their relationships with primary environmental factors in the summer of 2010	5972
..... GONG Yuyan, ZHANG Caixue, SUN Xingli, et al (5972)	
Morphological differences in statolith and beak between two spawning stocks for <i>Illex argentinus</i>	5986
..... FANG Zhou, CHEN Xinjun, LU Huajie, et al (5986)	
Relationships between coastal meadow distribution and soil characteristics in the Yellow River Delta	5998
..... TAN Xiangfeng, DU Ning, GE Xiuli, et al (5998)	
Variation analysis about net primary productivity of the wetland in Panjin region	6006
..... WANG Liwen, WEI Yaxing (6006)	
Mobilization of potassium from Soils by <i>rhizobium phaseoli</i>	6016
..... ZHANG Liang, HUANG Jianguo, HAN Yuzhu, et al (6016)	
Autotoxicity of aqueous extracts from plant, soil of peanut and identification of autotoxic substances in rhizospheric soil	6023
..... HUANG Yuqian, HAN Lisi, YANG Jinfeng, et al (6023)	
Effects of shading on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of <i>Trollius chinensis</i> Bunge	6033
..... LV Jinhui, WANG Xuan, FENG Yanmeng, et al (6033)	
Short-term effects of fire disturbance on greenhouse gases emission from sedge and shrubs forested wetland in Lesser Xing'an Mountains, Northeast China	6044
..... GU Han, MU Changcheng, ZHANG Bowen, et al (6044)	
Plant species diversity and community classification in the southern Gurbantunggut Desert	6056
..... ZHANG Rong, LIU Tong (6056)	
Effects of mixing leaf litter from <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> and <i>Larix principis-rupprechtii</i> with that of other trees on soil properties in the Loess Plateau	6067
..... LI Qian, LIU Zengwen, MI Caihong (6067)	
Effects of long-term intensive management on soil ammonia oxidizing archaea community under <i>Phyllostachys praecox</i> stands	6076
..... QIN Hua, LIU Borong, XU Qiufang, et al (6076)	
Hydrogen peroxide participates symbiosis between AM fungi and tobacco plants	6085
..... LIU Hongqing, CHE Yongmei, ZHAO Fanggui, et al (6085)	
Relationships between dominant arbor species distribution and environmental factors of shelter forests in the Beijing mountain area	6092
..... SHAO Fangli, YU Xinxiao, ZHENG Jiangkun, et al (6092)	
Analysis of rhizosphere microbial community structure of weak and strong allelopathic rice varieties under dry paddy field	6100
..... XIONG Jun, LIN Huifeng, LI Zhenfang, et al (6100)	
Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties	6110
..... HUANG Lin, WANG Feng, ZHOU Lijiang, et al (6110)	
Effect of silicon application on antioxidant system, biomass and yield of soybean under ozone pollution	6120
..... ZHAN Lijie, GUO Liye, NING Tangyuan, et al (6120)	
Effect of landfill leachate irrigation on soil physiochemical properties and the growth of two herbaceous flowers	6128
..... WANG Shuqin, LAI Juan, ZHAO Xiulan (6128)	
Nitrous oxide emissions affected by tillage measures in winter wheat under a rice-wheat rotation system	6138
..... ZHENG Jianchu, ZHANG Yuefang, CHEN Liugen, et al (6138)	
Effects of different fertilizers on soil enzyme activities and CO ₂ emission in dry-land of maize	6147
..... ZHANG Junli, GAO Mingbo, WEN Xiaoxia, et al (6147)	
The response of agro-ecosystem productivity to climatic fluctuations in the farming-pastoral ecotone of northern China: a case study in Zhunger County	6155
..... SUN Tesheng, LI Bo, ZHANG Xinshi (6155)	
The relationship between energy consumption and carbon emission with economic growth in Liaoning Province	6168
..... KANG Wenxing, YAO Lihui, HE Jienan, et al (6168)	
Spatial distribution characteristics of potential fire behavior in Fenglin Nature Reserve based on FARSITE Model	6176
..... WU Zhiwei, HE Hongshi, LIANG Yu, et al (6176)	
Chill conservation of natural enemies in maize field with different post-crop habitats	6187
..... TIAN Yaojia, LIANG Guangwen, ZENG Ling, et al (6187)	
Effect of population of <i>Kerria yunnanensis</i> on diversity of ground-dwelling ant	6195
..... LU Zhixing, CHEN Youqing, LI Qiao, et al (6195)	
Response of <i>Parnassius apollo</i> population and vertical distribution to climate warming	6203
..... YU Fei, WANG Han, WANG Shaokun, et al (6203)	
Review and Monograph	
Integrated assessment of marine aquaculture ecosystem health: framework and method	6210
..... PU Xinming, FU Mingzhu, WANG Zongling, et al (6210)	
Seagrass meadow ecosystem and its restoration: a review	6223
..... PAN Jinhua, JIANG Xin, SAI Shan, et al (6223)	
Nutri-toxicological effects of cyanobacteria on fish	6233
..... DONG Guifang, XIE Shouqi, ZHU Xiaoming, et al (6233)	
Effect of environmental stress on non-structural carbohydrates reserves and transfer in seagrasses	6242
..... JIANG Zhijian, HUANG Xiaoping, ZHANG Jingping (6242)	
Advances in ecological immunology	6251
..... XU Deli, WANG Dehua (6251)	
Scientific Note	
The causes of spatial variability of surface soil organic matter in different forests in depressions between karst hills	6259
..... SONG Min, PENG Wanxia, ZOU Dongsheng, et al (6259)	
Characteristics of seed rain of <i>Haloxylon ammodendron</i> in southeastern edge of Junggar Basin	6270
..... LÜ Chaoyan, ZHANG Ximing, LIU Guojun, et al (6270)	

《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 19 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 19 (October, 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