

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

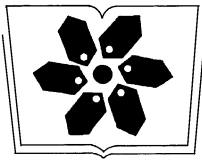
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第2期 Vol.33 No.2 **2013**

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 33 卷 第 2 期

2013 年 1 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展..... 陈洪松, 聂云鹏, 王克林 (317)
- 红树林植被对大型底栖动物群落的影响 陈光程, 余 丹, 叶 勇, 等 (327)
- 淡水湖泊生态系统中砷的赋存与转化行为研究进展..... 张 楠, 韦朝阳, 杨林生 (337)
- 纳米二次离子质谱技术(NanoSIMS)在微生物生态学研究中的应用 胡行伟, 张丽梅, 贺纪正 (348)
- 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架 赵荣钦, 黄贤金 (358)
- 城市温室气体排放清单编制研究进展..... 李 晴, 唐立娜, 石龙宇 (367)

个体与基础生态

- 科尔沁沙地家榆林的种子散布及幼苗更新..... 杨允菲, 白云鹏, 李建东 (374)
- 环境因子对木棉种子萌发的影响 郑艳玲, 马焕成, Scheller Robert, 等 (382)
- 五花米草与短叶荳蔻落物分解过程中碳氮磷化学计量学特征 欧阳林梅, 王 纯, 王维奇, 等 (389)
- 性别、季节和体型大小对吐鲁番沙虎巢域的影响 李文蓉, 宋玉成, 时 磊 (395)
- 遮蔽行为对海刺猬摄食、生长和性腺性状的影响..... 罗世滨, 常亚青, 赵 冲, 等 (402)
- 水稻和玉米苗上饲养的稻纵卷叶螟对温度的反应 廖怀建, 黄建荣, 方源松, 等 (409)

种群、群落和生态系统

- 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等 (416)
- 禁牧条件下不同类型草地群落结构特征 张鹏莉 陈 俊 崔树娟, 等 (425)
- 高寒退化草地狼毒与赖草种群空间格局及竞争关系 任 珩, 赵成章 (435)
- 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性 宋 媛, 赵溪竹, 毛子军, 等 (443)
- 新疆富蕴地震断裂带植被恢复对土壤古菌群落的影响 林 青, 曾 军, 张 涛, 等 (454)
- 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响 朱新玉, 董志新, 况福虹, 等 (464)
- 潮虫消耗木本植物凋落物的可选择性试验 刘 燕, 廖允成 (475)
- 象山港网箱养殖对近海沉积物细菌群落的影响 裘琼芬, 张德民, 叶仙森, 等 (483)
- 2005 年夏季东太平洋中国多金属结核区小型底栖生物研究 王小谷, 周亚东, 张东声, 等 (492)
- 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应 孙向阳, 王根绪, 吴 勇, 等 (501)

景观、区域和全球生态

- 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性 熊 伟, 杨 婕, 吴文斌, 等 (509)
- 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势 贺 伟, 布仁仓, 熊在平, 等 (519)
- 地表太阳辐射减弱和臭氧浓度增加对冬小麦生长和产量的影响 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等 (532)

资源与产业生态

- 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究 高明亮, 赵文吉, 官兆宁, 等 (542)
- 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异 陈 涛, 常庆瑞, 刘 京, 等 (554)

不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响..... 武 际,郭熙盛,鲁剑巍,等 (565)

施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响 吕 鹏,张吉旺,刘 伟,等 (576)

城乡与社会生态

城市景观组分影响水质退化的阈值研究 刘珍环,李正国,杨 鹏,等 (586)

长株潭地区生态可持续性 戴亚南,贺新光 (595)

外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗抗氧化系统和微量元素积累的影响 朱涵毅,陈益军,劳佳丽,等 (603)

达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成 孙园园,何 江,吕昌伟,等 (610)

绿洲土 Cd、Pb、Zn、Ni 复合污染下重金属的形态特征和生物有效性 武文飞,南忠仁,王胜利,等 (619)

柠檬酸和 EDTA 对铜污染土壤环境中吊兰生长的影响 汪楠楠,胡 珊,吴 丹,等 (631)

研究简报

海州湾生态系统服务价值评估 张秀英,钟太洋,黄贤金,等 (640)

内蒙古羊草群落、功能群、物种变化及其与气候的关系 谭丽萍,周广胜 (650)

氮磷供给比例对长白落叶松苗木磷素吸收和利用效率的影响 魏红旭,徐程扬,马履一,等 (659)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 352 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 38 * 2013-01



封面图说: 科尔沁沙地榆树——榆树疏林草原属温带典型草原地带,适应半干旱半湿润气候的隐域性沙地顶级植物群落,具有极强的适应性、稳定性,生物产量较高。在我国仅见于科尔沁沙地和浑善达克沙地。是防风固沙、保护沙区生态环境和周边土地资源的一种重要的植物群落类型,是耐旱沙生植物的重要物种基因库和荒漠野生动物的重要避难所和栖息地。这些年来,由于人类毁林开荒、过度放牧、甚至片面地建立人工林群落等的干扰,不同程度地破坏了榆树疏林的生态环境,影响了其特有的生态作用。

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

DOI: 10.5846/stxb201111091698

熊伟, 杨婕, 吴文斌, 黄丹丹, 曹阳. 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性. 生态学报, 2013, 33(2): 0509-0518.

Xiong W, Yang J, Wu W B, Huang D D, Cao Y. Sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0509-0518.

中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性

熊 伟^{1,*}, 杨 婕², 吴文斌³, 黄丹丹⁴, 曹 阳¹

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 北京 100081; 2. 中国农业大学资源和环境学院, 北京 100193;
3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 4. 中国农业科学院国际合作局, 北京 100081)

摘要:有效的适应措施需要了解两类基础信息,一是农业生产所面临的各种气候变异风险,二是作物产量对潜在气候变异风险的反应及其机制。评价作物生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性,可以在时间上和空间上揭示气候变化的趋势及作物产量对其的反应,从而为适应行动的全面开展提供基础信息。通过分析 1981—2007 年水稻生育期 3 个气候因子(平均温度、日较差、辐射)的变化对水稻产量的影响,评估我国水稻生产对这 3 个气候因子变化的敏感性和脆弱性及其区域分布状况。结果表明,1981—2007 年间我国大部分水稻产区生育期内 3 个气候因子均发生了明显变化,存在着气候变异风险,其中以最高温的变化最普遍和明显,导致水稻生产中高温热害风险增加。部分区域水稻产量变化与单一气象因子的变化存在着显著的线性相关,这些地区气候因子的变化可以一定程度地解释水稻产量变化趋势,其中产量变化对辐射变化最敏感。当水稻生育期内平均温度上升 1℃、日较差升高 1℃、辐射下降 10% 时,我国部分地区水稻产量随之发生了相应的变化,其中辐射降低导致我国水稻生产的脆弱面积最大,其次为日较差。受 3 种气象因子变化趋势的综合影响,约有 30% 的水稻产区对 1981—2007 年的气候变化趋势敏感,少部分地区表现为脆弱,但水稻主产区受到的影响不大,且在东北地区还集中表现出产量增加的趋势,为我国水稻发展提供了契机。

关键词:敏感性; 脆弱性; 气候变化; 水稻

Sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change

XIONG Wei^{1,*}, YANG Jie², WU Wenbin³, HUANG Dandan⁴, CAO Yang¹

1 Institute of Environment and Sustainable Development for Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

3 Institute of Agriculture Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

4 Department of International Cooperation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Effective agricultural adaptation to climate change needs two pieces of information, the climatic risks posed on crop growth, and yield responses to the risks and associated mechanisms. Assessing the sensitivity and vulnerability of crop production to observed climate change is able to produce such information, facilitates the investment of the limited adaptation resources. Use the relationships between changes in rice yield and climatic variables and their spatial variations, we identified the sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change (1981—2007). The growing-season mean climatic variables exhibited significant changes during 1961—2007, indicating the possible climatic risks for rice growth. The increase in day time temperature was most widespread and obvious, suggesting increased risks of heat stresses. The relationships between rice yield and the climatic variables were significant in some rice areas, with the

基金项目: 973 资助项目(2012CB9559-04, 2010CB951500-04); 国家自然科学基金资助项目(41171093); 国家科技支撑课题(2012BAC19B01)

收稿日期: 2011-11-09; 修订日期: 2012-02-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiongwei@ami.ac.cn

largest percent of the rice area showed yield sensitivity to changes in diurnal temperature range. With a 1°C warming in growing-season temperature, 1 °C increase in diurnal temperature range, and a 10% decrease in radiation, much of the rice areas showed depressed yield to these changes. The area with yield vulnerability was largest to the change in radiation, and second largest to the change in diurnal temperature range. The combined effects of the observed trends of the three climatic variables caused significant change in roughly 30% of the rice areas, but with a small portion showed yield vulnerability. In addition, the negative effects were not pronounced in the principal rice areas, such as Yangtze River Basin, especially in northeast China, the observed climatic trends substantially increased rice yield during the past decades.

Key Words: sensitivity; vulnerability; climate change; rice

应对气候变化有效的适应行动需要在时间和空间上掌握两类基本信息,其一是当前和未来所面临的主要的气候变异风险,其二是系统对面临的气候变异风险可能做出的反应^[1]。农业是最易受气候变化影响的部门之一,同时也是较易采取各种适应行动,减缓气候变化不利影响的部门之一^[2]。开展农业生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性研究,可以了解作物生产所面临的气候变异风险和作物生产对气候变化趋势的反应,对科学地开展因地制宜的适应行动,减少气候变化对农业生产的负面影响有重大意义^[3]。

1996 年 IPCC 第二次气候变化评估报告中指出:敏感性是指系统对外界条件变化的反应程度,脆弱性则是系统对气候变化的敏感性和系统对气候变化适应能力的综合反映。因此研究农业生产对气候变化的敏感性和脆弱性,就是探讨气候变化对农业生产的可能影响以及农业生产对气候变化的可能响应问题,不但涉及各种气候因素变化对农业生产过程的影响,还与当地社会经济、环境和农业生产条件对气候变化的适应程度有关。

近年来,部分学者尝试利用指标、模拟等不同方法和手段对农业生产的敏感性和脆弱性开展研究^[3-6],回答全国和部分地区农业生产对历史或未来气候变化的敏感性和脆弱性,然而目前研究中对减缓或消除气候变化潜在危害的适应对策和能力还难以量化评估,导致研究结果之间的差异性较大。农业统计产量是作物在实际生产状况下的最终结果,其产量的形成过程受到气候、环境因子、农业管理等各种因素的综合影响,因此统计产量本身的时间序列变化,既包含着气候和环境因子对作物产量的影响,又涵盖着管理、社会、经济等对作物产量的贡献,所以与指标法和模拟法相比,研究统计产量的变化情况,更能客观地反映出农业生产对气候因子的敏感程度和社会-经济-农业对气候变化的适应能力,有利于了解农业生产对气候因子变化的敏感和脆弱程度及其区域分布状况。

水稻是我国主要的粮食作物,我国水稻生产在世界稻作中占重要地位,考虑到我国饮食习惯,可以说水稻生产不但关系到我国粮食生产,而且与国民经济发展、社会稳定息息相关。本研究利用 1981—2007 年网格化气候因子和水稻统计产量数据,通过研究产量变化与各气候因子变化的关系,分析中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性,了解气候变化对我国水稻生产的影响,为今后因地制宜地开展适应行动,促进我国水稻生产发展提供科学参考。

1 材料和方法

1.1 数据来源和处理

1981—2007 年全国 50km×50km 网格化月平均天气数据来源于国家气象信息中心^[7],数据由 760 多个实测站点按高程修正的普通克里金法(Ordinary Kriging)内插而得,包括各月的平均气温(T)、最高气温($T_{\max}$)、最低气温($T_{\min}$)和日照时数(R)等,其中日较差(DTR)为该月逐日日较差的均值,日照时数按 Pohlert^[8]方法转换为太阳辐射。各地水稻生育期来源于《全国农业气象资源图集》^[9],由全国水稻生育期图确定,其中北方单季稻大体为 5—9 月,长江流域和南方双季稻区大体为 4—9 月。

1981—2007 年农业分县统计数据来源于中国农业科学院农业信息研究所,数据以县为单位,包括作物面

积、总产、单产、农业投入等多项指标。由于统计数据在一些区县和一些年份存在着误差(如由于行政区划变更导致的数据缺失或重复,某些年段统计结果与可能的实际值相差较大等),因此在应用数据之前,参照全国农调队调查产量数据对不合理的统计数据进行了剔除,同时为了与网格化天气数据格式保持一致,故基于天气站点网格,按权重面积对剔除后的历年区县产量统计数据进行了网格化^[10],全国有耕地的网格 2429 个(台湾除外),其中有水稻统计数据的网格为 1896 个。

1.2 研究方法

本研究首先分析了 1981—2007 年我国水稻生育期各网格的气候要素的变化趋势,了解各网格的气候变异风险;然后利用产量与单一气候要素之间的线性回归模型,分析产量对单一气候因素的敏感性和脆弱性;最后构建产量与各气象因子之间的逐步回归模型,综合评估产量对 1981—2007 年气候变化的敏感性和脆弱性。

1.2.1 1981—2007 年水稻生育期各网格气候要素 ΔX 的变化趋势

采用趋势分析法计算 1981—2007 年各网格水稻生育期气候要素 ΔX (生育期内平均温、最高温、最低温、日较差、辐射)的变化趋势(由于大部分地区的水稻生长在灌溉条件下,因此没有考虑降水的影响),并利用 t 检验判断气候要素变化的显著性,以了解我国 1981—2007 年水稻生育期的气候变异风险。

1.2.2 分析产量变化 ΔY 对单一气候因子 ΔX 的敏感性和脆弱性

首先采用一阶差分法获得每个网格统计产量的变化量 ΔY ,近年来一阶差分法在评估气候变化的影响中得到了应用^[11-12],它可以一定程度地去除缓慢变化因子对变量的影响,研究表明,采用产量的一阶差分值得到的统计结果与对产量线性去趋势化的统计结果基本一致^[12]。

其次,建立产量的变化量 ΔY 与气候因子 ΔX 之间的线性回归方程,拟合两者之间的关系,利用 t 检验考查其显著性,并根据两者之间的线性关系判断网格水稻生产对单一气候因子的敏感性和脆弱性。即:如果产量变化与气候要素之间存在着显著($P < 0.05$)的线性相关,则可认为该气候因素对水稻产量有显著影响,产量对气候因子的变化具有较高的敏感性, r^2 值可理解为气候因子变化对产量变化的解释程度,并通过线性回归方程可得出产量变化对该气候因子是正敏感还是负敏感(即正相关还是负相关)。由于统计产量是生产的实际结果,因此统计产量的差异在一定程度上能够反映各种适应措施的效果和区域间适应能力的差异,其变化程度可在一定层面上反映水稻生产的脆弱性程度,所以如果当某网格的 ΔY 与 ΔX 之间的回归模型表明该网格水稻生产对该气候因子敏感,且显著地造成产量减产时,说明该网格水稻生产对该气候因子脆弱,而减产程度与脆弱程度正相关。

例如利用一阶差分法计算得出某网格 1981—2007 年水稻产量变化量 ΔY ,将 ΔY 与该网格 1981—2007 年水稻生育期的气候因子 ΔT 建立线性关系: $\Delta Y = -424\Delta T + 1307$,两者的线性关系达显著水平($P < 0.05$), r^2 为 0.27,则说明 1981—2007 年该网格内平均温度的变化可以解释 27% 的水稻产量年际变化,水稻产量对平均温度升高为负敏感,当平均温度升高 1℃ 时,当地水稻产量下降了 424 kg/hm²。为了增加产量变化幅度在区域间的可比性,以 1981—2007 年该地水稻平均产量为基准,计算产量变化百分率,即如果当地 1981—2007 年水稻平均产量为 5600 kg/hm²,则平均温度上升 1℃ 时,当地水稻产量下降了 7.6%,因此该地区水稻生产对平均温度的变化表现敏感,温度升高使该地水稻显著减产,水稻生产对温度升高表现为脆弱。

1.2.3 综合评估 1981—2007 年气候变化对水稻产量的影响

气候变化本身是一个多气候因子相互作用的复杂过程,统计产量的变化 ΔY 是各气候因子综合影响的结果,因此研究中构建了某网格的 ΔY 与该网格内各气候因子 ΔX (由于日较差是最高温、最低温变化的反映,因此不再考虑最高温、最低温的变化)的逐步回归模型,以考察气候变化对网格统计产量的变化的综合影响,并根据各网格的逐步回归方程,评估了各气候因子对产量变化的贡献^[13]。

2 结果和分析

2.1 1981—2007 年水稻生育期气候变异风险分析

1981—2007 年水稻生育期各气候因子的变化趋势如表 1。从全国来看,水稻生育期日平均气温、平均最

高温和平均最低温均在 99% 的置信水平下 ($P < 0.01$) 显著增加,增幅分别为 $0.39\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。由于最高温上升速度高于最低温,造成日较差呈显著上升趋势 ($P < 0.05$),上升幅度为 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。全国水稻生育期辐射量略有减少,但变化趋势不显著。

表 1 1981—2007 年水稻种植区域水稻生育期内各气候因子的变化趋势

Table 1 The changing trends of the rice growing-season climatic variables from 1981 to 2007

区域 Region	省 Province	温度 $T/(^{\circ}\text{C}/10\text{a})$	最高温 $T_{\max}/(^{\circ}\text{C}/10\text{a})$	最低温 $T_{\min}/(^{\circ}\text{C}/10\text{a})$	日较差 $DTR/(^{\circ}\text{C}/10\text{a})$	辐射 $R/(\text{J}/10\text{a})$
华北 North	北京 Beijing	0.36 *	0.23	0.48 **	-0.25 *	-157.2 **
	天津 Tianjing	0.40 **	0.31	0.48 **	-0.16	-185.6 **
	河北 Hebei	0.39 **	0.28	0.51 **	-0.23 *	-146.0 **
	山西 Shanxi	0.51 **	0.47 **	0.54 **	-0.07	-86.4 *
	内蒙 Neimeng	0.56 **	0.64 **	0.48 **	0.15	28.2
东北 Northeast	辽宁 Liaoning	0.45 **	0.41 *	0.48 **	-0.07	-10.0
	吉林 Jilin	0.47 **	0.50 **	0.45 **	0.06	-8.3
	黑龙江 Heilongjiang	0.48 **	0.50 **	0.46 **	0.04	23.0
华东 East	上海 Shanghai	0.74 **	0.79 **	0.68 **	0.11	-8.6
	江苏 Jiangsu	0.60 **	0.58 **	0.62 **	-0.04	-43.3
	浙江 Zhejiang	0.57 **	0.76 **	0.37 **	0.39 **	2.2
	安徽 Anhui	0.50 **	0.57 **	0.43 **	0.14	-32.8
	福建 Fujian	0.27 **	0.37 **	0.17	0.20 *	-34.1
	江西 Jiangxi	0.31 **	0.40 **	0.23 *	0.17	-34.9
	山东 Shandong	0.34 **	0.21	0.47 **	-0.26 *	-138.9 **
华中 Middle	河南 Henan	0.37 **	0.37 *	0.37 **	-0.01	-86.1 *
	湖北 Hubei	0.50 **	0.56 **	0.43 *	0.13	-52.5
	湖南 Hunan	0.34 **	0.41 **	0.26 **	0.15 *	-11.9
华南 South	广东 Guangdong	0.29 **	0.35 **	0.22 **	0.13 *	-6.7
	广西 Guangxi	0.20 *	0.21 *	0.18 *	0.03	-17.6
	海南 Hainan	0.24 **	0.18 *	0.29 **	-0.11 *	-41.8
西南 Southwest	重庆 Chongqing	0.40 **	0.60 *	0.20 *	0.39 **	56.3
	四川 Sichuan	0.48 **	0.66 **	0.30 **	0.37 **	29.2
	贵州 Guizhou	0.17	0.24	0.10	0.13	-36.6
	云南 Yunnan	0.19 *	0.1	0.27 **	-0.16	-13.0
	西藏 Xizhang	0.19	-0.1	0.47 **	-0.57 **	-112.4 **
西北 Northwest	陕西 Shanxi	0.51 **	0.70 **	0.32 **	0.38 *	50.7
	甘肃 Ganshu	0.58 **	0.62 **	0.53 **	0.08	49.8
	青海 Qinghai	0.62 **	0.72 **	0.52 **	0.20	-20.0
	宁夏 Ningxia	0.57 **	0.54 **	0.61 **	-0.07	2.0
	新疆 Xinjiang	0.36 **	0.23	0.50 ***	-0.27 **	9.3
全国 China	0.39 **	0.46 **	0.32 **	0.14 *	-19.7	
气候因子显著变化的水稻种植面积占全国水稻面积比例 The percent of rice area with significant changes in climatic variables						
显著上升 Increase/%		85.2	83.5	74.6	40.8	7.6
显著下降 Decrease/%		6.7	14.3	4.6	5.1	7.4

* 在 95% 置信区间内显著, ** 在 99% 置信区间内显著

从各省来看,绝大部分省市(除贵州和西藏)水稻生育期平均温度均呈显著上升趋势,变化幅度在 $0.1\text{—}0.8\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 之间,较为集中在 $0.3\text{—}0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 范围内,其中华东地区的上海、江苏等省上升速度较快,达 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 以上,这可能与该地区快速城市化有一定关系,云南、广西、海南等省上升速率相对较慢。大多数省市

最高温、最低温也发生显著变化,且最高温度变化幅度较最低温明显。受最高温、最低温变化的影响,日较差变化各省市有增有减,但趋势不明显,在变化达显著的省份中,重庆、浙江、四川、湖南等水稻面积较大的省市以日较差上升为主。辐射量的变化有增有减,绝大部分省市趋势不明显,在显著变化的省市,辐射均发生了明显减少。

计算气候因子变化显著的水稻种植区域面积占全国水稻播种面积的比例时发现,平均温度、最高温、最低温显著上升($P<0.05$)的面积比例(分别为85.2%、83.5%和74.6%)均高于显著下降的比例(分别为6.7%、14.3%和4.6%),仅有少部分种植区这3个气候因子的变化未达到极显著水平。3个气候因子相比,最高温显著变化的区域最普遍,面积比例最大,在一定程度上说明1981—2007年水稻生产中极端高温事件的概率有所增加,极端高温事件导致热害风险增大。全国水稻种植区的日较差变化达极显著水平的约占45.9%左右,以增大为主。而辐射量发生显著变化的区域较少,不超过15%,其中显著上升与显著下降的比例相当。

可见,1981—2007年在水稻生育期内各气候因子确实发生了变化,存在着气候变异风险,其中温度变化趋势最明显,平均温度、最高温、最低温的变化在绝大多数省份和种植区域都呈极显著上升趋势,尤其以最高温度显著变化的面积比例最大,说明气候变化导致水稻生产高温热害风险增大。日较差、辐射量的变化趋势规律不明显,只在部分区域有显著的变化,但辐射显著变化的省份,均表现为明显减少,水稻生产寡照风险增加。

3.2 我国水稻产量对单一气候因子变化的敏感性和脆弱性分析

构建1981—2007年水稻生育期气候要素 ΔX 与水稻产量变化 ΔY 之间的线性回归模型,分析水稻生产对单一气候因子变化的敏感性。表2列出了全国水稻种植区域中,网格产量变化对各气候因子敏感的比例,即气候因子与产量变化之间存在显著线性相关的网格水稻面积占全国水稻播种总面积的比例。从表中可见,水稻产量变化对辐射最敏感,敏感面积比例为19.0%,其中以正敏感为主,占了10.8%,平均 r^2 达到0.20左右,即约有10.8%水稻种植面积,辐射变化与水稻产量呈正相关,这些地区辐射的变化可以解释20%的水稻产量变化,这可能与辐射变化直接影响了作物的光合作用有关,以往的研究也在部分地点发现水稻产量对辐射变化最敏感^[14],尽管1981—2007年我国水稻生育期的辐射变化在上述的气候因素中存在的风险最小,但由于水稻产量对辐射最敏感,因此在未来水稻生产中,针对辐射的适应仍是不可忽视的问题。其次产量变化对日较差敏感,敏感面积约为16.7%,正敏感比例略大于负敏感,由于日较差的变化综合反映了最高温、最低温的变化,因此日较差对产量的影响可能与高温热害、低温冷害有一定关系。产量对平均温度变化最不敏感,但由于水稻生育期温度变化风险较大,因此如何开展针对温度变化的适应仍是我国水稻生产需要重点考虑的问题。

表2 对单一气候因子变化敏感的水稻区域面积比例

Table 2 The percent of rice area with significant positive/negative responses to changes in growing-season climatic variables

对气候因子的变化 To changes in climatic variables	平均温度 T	最高温度 $T_{\max}$	最低温度 $T_{\min}$	日较差 DTR	辐射 R
对单一气候因子敏感的面积比例 Sensitive area/%	10.8	12.2	10.6	16.7	19.0
正敏感区比例 Positive sensitive/%	5.2	6.3	5.5	9.2	10.8
平均 r^2 Average r^2	0.13	0.14	0.16	0.14	0.20
负敏感区比例 Negative sensitive/%	5.6	5.9	5.1	7.5	8.2
平均 r^2 Average r^2	0.17	0.19	0.14	0.18	0.23

若某网格水稻产量对某气候因子 ΔX 敏感,且 ΔX 造成该网格水稻产量显著减产时,说明该网格水稻生产对该气候因子脆弱。由于日较差是最高温、最低温综合变化的反映,因此在此不再探讨 ΔY 对最高温、最低温的脆弱。此外,考虑到我国水稻产量对辐射变化最敏感,以及我国多数网格都面临着平均温度、日较差上升的气候变异风险,因此图1主要探讨了产量对平均温度上升1℃、日较差上升1℃、辐射下降10%时的反应,以了

解水稻产量对单一气候因子变化的脆弱程度及其分布状况。

图 1 显示了平均温度上升 1°C 时我国水稻产量的敏感区分布状况, 东北东部相对集中地表现为水稻产量随温度升高而增产, 增产幅度在 4%—20% 之间, 较为集中在 16% 左右。这可能与温度升高, 改善了东北地区热量条件有关, 研究表明, 近 30 年来的气候变暖为东北地区的水稻种植提供了气候条件, 东北地区水稻面积已在逐渐北扩^[15-16], 据统计, 2000 年黑龙江省水稻种植面积已是 1980 年 7 倍^[17-18], 因此抓住东北地区的热量条件, 对促进我国水稻生产的发展具有重要意义, 但是在推进东北地区水稻发展过程中, 冷冻害的防御措施也必须跟上。在江西、云南、陕西、山西等省的部分地区, 水稻产量对温度升高 1°C 表现为脆弱, 但脆弱的面积和幅度相对较小, 而我国水稻主产区基本不敏感, 可见平均温度升高 1°C 对我国水稻生产并未造成较大的负面危害。

当日较差升高 1°C 时, 我国约有 7.5% 的水稻面积, 产量对日较差脆弱, 在河北、山东、贵州、云南、湖南等地均有分布, 减产幅度在贵州、河北相对较大, 而在云南、湖南、广东等地则在 -10% 以内 (图 1)。日较差升高意味着最高温度升高幅度大于最低温度的变化, 这种变化造成减产的原因, 可能与最高温度升高导致水稻热害败育有关。由于我国绝大部分水稻种植区, 最高温度显著上升是最普遍的气候变异风险, 因此如何采取措施降低高温热害是需要重点关注的问题。

当辐射下降 10% 时, 我国约有 8% 的水稻面积, 产量出现减产 (图 1), 这可能与辐射降低, 光照强度不足, 影响光合作用有关, 这些脆弱的区域主要集中在黑龙江、新疆、宁夏、安徽、湖南、湖北、浙江等省, 其中黑龙江、新疆等地脆弱的程度较大, 最大超过 -30%, 主要集中在 -20% 左右, 而浙江、安徽、湖北、湖南等地减产的幅度相对较小, 一般在 10% 以内, 贵州、河北、云南、甘肃、内蒙等省的部分地区产量随辐射的降低略有增加。

综上所述, 我国部分地区水稻产量随着平均温度上升 1°C 、日较差升高 1°C 、辐射下降 10% 发生了反应,

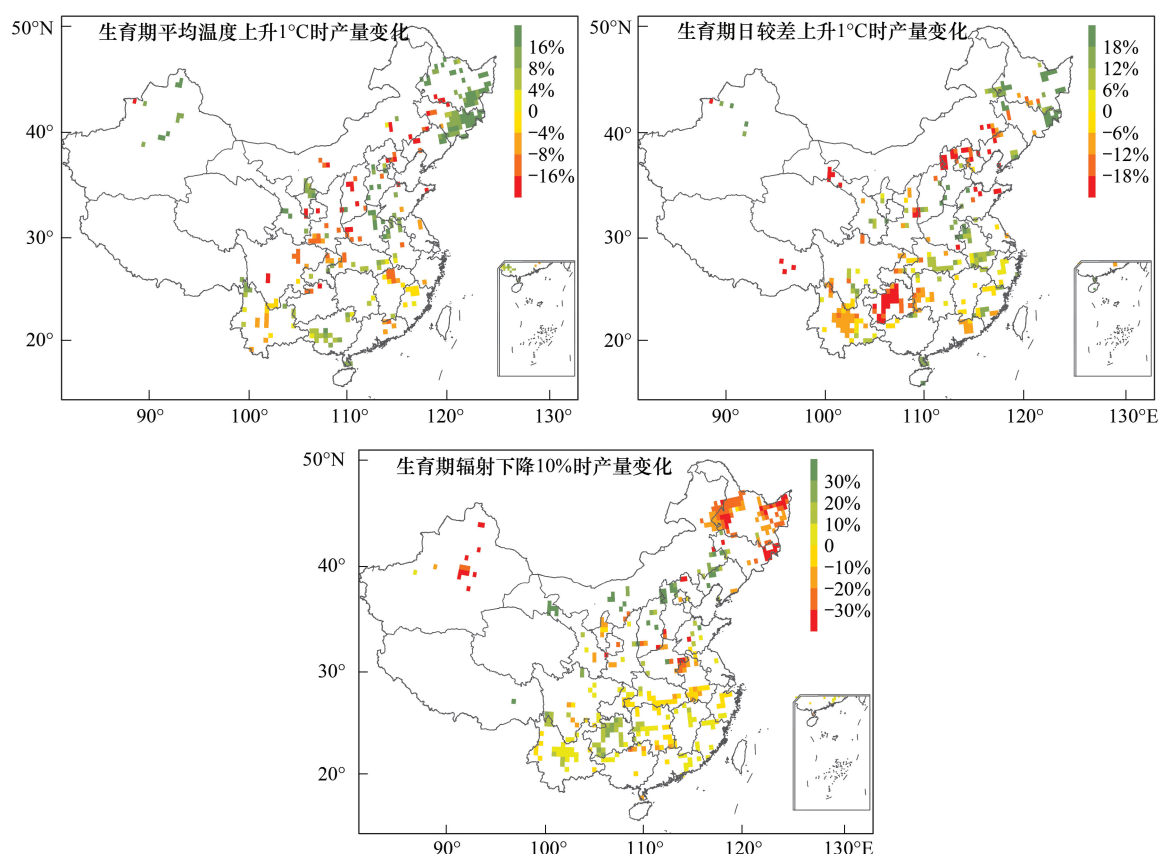


图 1 水稻产量与生育期内各气象要素变化的反映

Fig. 1 Regional patterns of rice yield responses to a 1°C increase in temperature, a 1°C increase in DTR, and a 10% decrease in radiation

部分地区表现出一定幅度的减产,江西、云南、陕西、山西等省的部分地区,水稻产量对平均温度升高表现为脆弱,河北、山东、贵州、云南、湖南等地对日较差升高表现脆弱,在黑龙江、新疆、安徽、湖南、湖北、浙江等省对辐射降低表现脆弱,但脆弱的幅度不大,且在我国水稻主产区受各因素影响并不大。

2.3 我国水稻生产对 1981—2007 年气候变化的敏感性及脆弱性分析

水稻产量的变化 ΔY 是各气候因子综合作用的结果,研究构建了 ΔY 与 3 种气候因子之间的逐步回归方程,若该网络的逐步回归方程达到显著水平 ($P < 0.05$),则将此网格 1981—2007 年所发生的气候因子变化代入方程,求算其 1981—2007 年的产量变化量,以考察历史气候变化对水稻产量的变化的综合影响,分析水稻生产对 1981—2007 年的气候变化的敏感性和脆弱性。我国水稻产量对 1981—2007 年气候变化的敏感、脆弱程度及其区域分布状况见图 2。

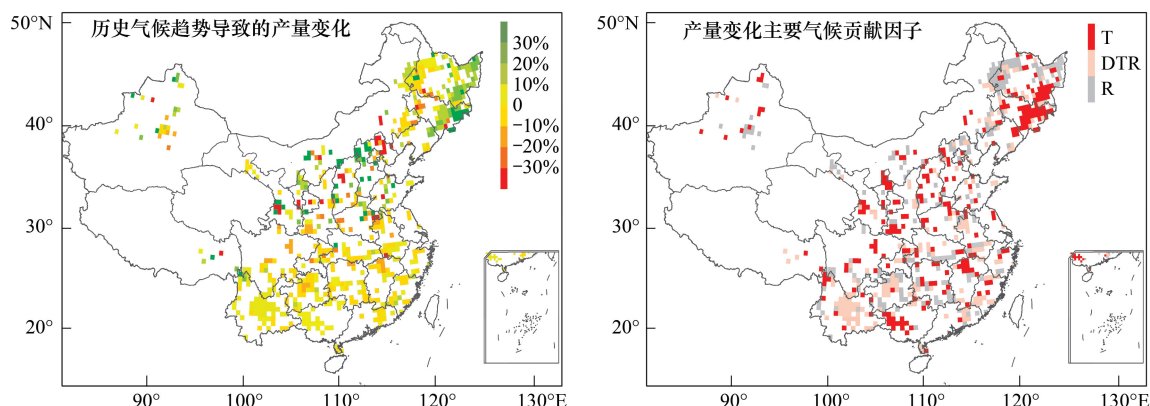


图 2 历史气候变化趋势导致的水稻产量变化百分比及主要贡献气候因子

Fig. 2 The spatial patterns of estimated net effects caused by past climatic trends, and the key contributor for the effects

从图 2 可知,受气候变化的复杂性影响,无论水稻产量对气候变化的敏感面积、脆弱面积、还是程度上都可以看出,与任意一种(仅指本研究所探讨的)单一气候因子影响相比,气候因子的综合影响对我国水稻产量的冲击更大,1981—2007 年我国部分地区水稻产量对气候变化是敏感的,敏感区面积约占水稻播种面积的 29.5%,其中部分地区(约 16%)表现为气候变化导致水稻产量下降,即水稻产量对气候变化脆弱,脆弱程度在-1%--40%之间,主要集中在-10%以内,这些脆弱区域在全国各省市均有分布,但水稻主产区受到的影响不大,脆弱面积和脆弱程度都较小。在我国东北部地区还集中表现出较大面积和比例的增产,从近年来东北地区水稻生产的发展来看,气候变化的确推动了我国东北地区水稻生产的发展,未来气候变暖仍在持续,因此抓住东北地区气候变化带来的热量资源契机,进一步提高该地区水稻产量,对稳定和提高我国水稻总产具有重要意义。

根据逐步回归方程,进一步分析了 3 种气候因子在气候变化对产量综合影响的贡献情况(图 2)。从图上可见,在产量对气候变化敏感的区域中,平均温度作为影响的主导因子所占的区域面积最大(37%),日较差和辐射作为主导因子造成敏感的面积均为 31%左右,从区域分布情况来看,以温度为主导因子的区域相对集中在东北、广西、江西、宁夏、陕西等省,其中温度主要使东北地区、广西、宁夏等地水稻增产,而使陕西、江西等地水稻减产,由于这些地区 1981—2007 年平均温度风险明显,因此水稻生产中对温度的适应是首要关注的问题。日较差升高在云南、贵州、福建、安徽等地相对集中地表现为主导作用,且主要造成水稻减产,这可能与这些地区夏季极端高温事件频繁有一定关系,而未来这些地区最高温度呈现明显增加趋势,因此这些地区水稻生产中防御高温热害是首要关注的问题。辐射在黑龙江、河北、贵州、湖南、湖北等地相对集中地显现主导作用,黑龙江、贵州、湖南主要是水稻增产,河北、湖北、贵州等地主要是减产,因此各地生产应因地制宜,解决气候变化造成的主要问题,抓住热量资源的改善,促进生产发展,保障我国水稻生产。

综上可见,1981—2007 年我国约有 30% 种植区的水稻产量对气候变化敏感,少部分地区表现为对气候变

化脆弱,但我国水稻主产区受到的影响不大,考虑到我国气候变异风险,未来气候变化还在持续,生产中关注水稻的敏感区和脆弱区,减缓和适应气候变化,同时抓住气候变化带来的热量资源契机,对稳定和提高我国水稻总产具有重要意义。

在产量对气候变化敏感的区域中,温度作为影响的主导因子所占区域面积比例最大,温度也是导致产量脆弱面积比例最大的主导因子。从区域分布情况来看,各区域影响水稻产量的主导因子有所差异,因此各地生产应因地制宜,解决气候变化带来的主要问题,保障我国水稻的生产。

3 讨论和结论

3.1 讨论

由于农业生产系统的复杂性,目前对其进行敏感性和脆弱性评估还没有统一认可的研究方法和指标,加上气候变化本身涵盖着复杂的信息量(不但包括温度、降水等气候因子的平均变化、还包括温度、降水等气象因子的时空分布变化、极端天气事件的变化等等),这就进一步加大了农业生产对气候变化的敏感性和脆弱性研究的复杂性和难度。目前的研究对减缓或消除气候变化潜在危害的适应对策和能力还难以量化评估,有学者提出,由于敏感性和脆弱性更关注多种因素影响的结果而非过程,所以选择所关注的重点农业指标(如产量变化),通过分析其对特定气候因子变化的反应是简化敏感性和脆弱性评价方法,得出定量结论的一种有效尝试^[19]。本研究正是基于这种思路,选择作物统计产量的变化,考察了3种气候因子与作物统计产量的关系,尝试客观地分析我国水稻产量在哪些地区对哪种气候因子变化会做出反应,以及如何反应,以了解水稻生产的敏感性和脆弱性。

但是研究中,还存在一定的不确定性:

(1)由于气候变化本身的复杂性,研究仅就气候因子的平均变化作了探讨,而对气候因子的时间分布、以及极端气候事件等没有涉及。

(2)气候因子之间彼此非独立,一种因子的变化往往会引起另一因子变化,而本研究分析某一气候因子对产量变化的影响时,没有考虑到因子之间的互作问题,可能会夸大单个气候因子的作用。

(3)研究选择统计产量作为分析对象,是因为该产量是作物在实际生产状况下的最终结果,其产量的形成过程受到气候、环境因子、农业管理等各种因素的综合影响,既涵盖着气候和环境因子对作物产量的影响,又包括着管理、社会、经济等对作物产量的贡献,更能客观地反映出农业生产对气候因子的敏感程度和社会-经济-农业对气候变化的适应能力,因此统计产量的数据质量是影响分析结果的关键因素之一。由于我国农业生产的特点,在一定程度上限制了我国农业统计产量的数据质量,因此在对数据进行分析之前,利用全国农调队调查产量数据对部分区县部分年份的统计产量进行了删减,同时,按照面积权重方法对统计数据进行了空间归并,在一定程度上增加了统计数据的可信程度,如利用该处理过程得到的1981—2000年统计产量的空间分布格局与利用区域作物模型模拟的作物产量空间格局有较好的一致性^[20-21],但在部分非主产区差异还是存在;此外,统计产量也受农产品价格、农业政策等因素影响,因此年与年间的产量值之间可能并不一定独立,这也会使统计分析结果具有一定误差。

(4)统计产量的变化是受到气候因子、管理、技术、政策、社会经济等多种因素影响的综合结果,考虑到脆弱性是系统对气候变化的敏感性和系统对气候变化适应能力综合反映,因此与气候变化有关的管理调整是不能忽略的,例如东北地区1980年以来,随着气候变暖,水稻面积扩大,水稻产量上升,就与该地区温度升高有一定的关系。但也有一些因素是应该剔除,如政策调整等,尽管研究中试图运用一阶差分法(First Difference)来去除一些缓慢变化因素对产量的影响,尽量分离出这些因素对产量的影响,但目前为止还无法达到,因此在评价上还存在一定的不确定性。

3.2 结论

虽然本文的敏感性和脆弱性分析还存在着上述的不确定性,但它仍能定量地反映出中国水稻生产的敏感和脆弱情况。

(1) 1981—2007 年间中国大部分水稻产区,生育期内各气候因子确实发生了变化,存在着气候变异风险,其中以温度的变化最普遍和明显,平均温度、最高温、最低温的变化在绝大多数省份都呈极显著上升趋势,其中最高温度显著变化的面积比例最大,导致水稻生产高温热害风险增加,而辐射量变化趋势不明显,只在部分省份变化显著,但显著变化的省份均表现为减少趋势。

(2) 中国部分区域水稻产量变化与日较差、辐射、平均温度的变化存在着显著的线性相关,这些地区单一气候因子的变化可以解释一定程度的产量变化,其中产量变化与辐射变化的关系最为密切,其次是日较差。

(3) 我国部分地区水稻产量随着平均温度上升 1℃、日较差升高 1℃、辐射下降 10% 发生了相应的变化,其中部分地区水稻生产表现为脆弱,其中辐射导致脆弱的范围最大,其次是日较差。由于各区域所受影响有所差异,因此因地制宜地解决气候变化带来的主要矛盾,才能有效地保障我国水稻生产。

(4) 受 3 种气候因子变化的综合影响,1981—2007 年我国约有 30% 的种植区水稻产量对气候变化敏感,少部分地区还表现为脆弱,其中温度作为主导因子引起产量敏感和脆弱的面积比例最大。但我国水稻主产区受到的影响不大,而且在东北地区还集中表现出较大面积和比例的增产,因此在因地制宜解决气候变化带来的主要矛盾的同时,抓住气候变化带来的热量契机,将有利于稳定和促进我国水稻生产的发展。

References:

- [1] Lobell D B, Banziger M, Magorokosho C. Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials. *Nature climate change*, 2011, 1: 42-45.
- [2] The Compiling Committee of China's Second National Assessment Report Climate Change. *China's Second National Assessment Report on Climate Change*. Beijing: Science Press, 2010.
- [3] Wang F T, Liu W Q. A preliminary study of climate vulnerability of agro-production in the Loess Plateau. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(1): 91-100.
- [4] Yang X, Sun F, Lin E D, Ju H, Xiong W. Sensitivity and vulnerability of rice to climate change in China. *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(5): 85-89.
- [5] Sun F, Yang X, Lin E D, Ju H, Xiong W. Study on the sensitivity and vulnerability of wheat to climate change in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(4): 692-696.
- [6] Zhao Y X, He L, Liu S D. Evaluation method of agro-ecosystem vulnerability. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(5): 754-758.
- [7] Zhang Q, Xiong AY, Ruan X. Research and development of the grid-based surface air temperature in China. *China Science & Technology Resources Review*, 2008, 40(3): 14-22.
- [8] Pohlert T. Use of empirical global radiation models for maize growth simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 126: 47-58.
- [9] The Compiling Committee of China's National Atlas. *National Agricultural Atlas of China*. Beijing: China map press, 1989.
- [10] Xiong W, Holman I, Conway D, Lin E, Li, Y. A crop model cross calibration for use in regional climate impacts studies. *Ecological Modelling*, 2008, 213: 365-80.
- [11] Nicholls N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends. *Nature*, 1997, 387: 484-485.
- [12] Lobell D B, Field C B. Global scale climate-crop yields relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2007, 2: 1-7.
- [13] Liu Y, Wang E, Yang X G M, Wang J. Contributions of climatic and crop varietal changes to crop production in the North China Plain, since 1980s. *Global Change Biology*, 2010, 16: 2289-2299.
- [14] Zhang T, Zhu J, Wassmann R. Responses of rice yields to recent climate change in China: an empirical assessment based on long-term observations at different spatial scales (1981—2005). *Agri-Forest Meteorology*, 2010, 150: 1128-1137.
- [15] Fang XQ, Sheng JF. Human adaptation to climate change: a case study of changes in paddy planting area in Heilongjiang Province. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(3): 213-217.
- [16] Yang X, Lin E D, Ma S M, Ju H, Guo L P, Xiong W, Li Y, Xu Y L. Adaptation of agriculture to warming in Northeast China. *Climatic Change*, 2007, 84: 45-58.
- [17] Wang Y, Fang X Q, Xu T, Dai Y J. Impact of climate warming and adaptation activities of rice plantation in Northeast China. *Resources Science*, 2005, 27(1): 121-127.
- [18] Pan H S, Zhang G H, Zhu S H. The effect of climate warming-up for the development of rice in Heilongjiang province and the strategy studies.

Heilongjiang Meteorology, 2002, 4: 7-18.

- [19] Luers A L, Lobell D B, Sklar L S, Addams C L, Matson P A. A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. *Global Environmental Change*, 2003, 13: 255-267.
- [20] Xiong W, Matthews R, Holman I, Lin E D, Xu Y L, Modelling China's potential maize production at regional scale under climate change. *Climatic Change*, 2007, 85: 433-451.
- [21] Xiong W. The performance of regional simulation of CERES-Rice model and its uncertainties. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2003-2009.

参考文献:

- [2] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社. 2010.
- [3] 王馥棠, 刘文泉. 黄土高原农业生产气候脆弱性的初步研究, 气候与环境研究, 2003, 8(1): 91-100.
- [4] 杨修, 孙芳, 林而达, 居辉, 熊伟. 我国水稻对气候变化的敏感性和脆弱性. 自然灾害学报, 2004, 13(5): 85-89.
- [5] 孙芳, 杨修, 林而达, 居辉, 熊伟. 中国小麦对气候变化的敏感性和脆弱性研究. 中国农业科学, 2005, 38(4): 692-696.
- [6] 赵艳霞, 何磊, 刘寿东. 农业生态系统脆弱性评价方法. 生物学杂志, 2007, 26(5): 754-758.
- [7] 张强, 熊安元, 阮新. 中国地面气温格点化数据集的研制. 中国科技资源导刊, 2008, 40(3): 14-22.
- [9] 国家地图集编纂委员会. 中华人民共和国国家农业地图集. 北京: 中国地图出版社, 1989.
- [15] 方修琦, 盛静芬. 从黑龙江省水稻种植面积的时空变化看人类对气候变化影响的适应. 自然资源学报, 2000, 15(3): 213-217.
- [17] 王媛, 方修琦, 徐钹, 戴玉娟. 气候变暖与东北地区水稻种植的适应行为. 资源科学, 2005, 27(1): 121-127.
- [18] 潘华盛, 张桂华, 祖世亨. 2002. 气候变暖对黑龙江省水稻发展的影响及其对策的研究. 黑龙江气象, (4): 7-18.
- [21] 熊伟. 站点 CERES-Rice 模型区域应用效果和误差来源. 生态学报, 2009, 29(4): 2003-2009.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.2 January ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions; a review CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, WANG Kelin (317)
- Impacts of mangrove vegetation on macro-benthic faunal communities CHEN Guangcheng, YU Dan, YE Yong, et al (327)
- Advance in research on the occurrence and transformation of arsenic in the freshwater lake ecosystem ZHANG Nan, WEI Chaoyang, YANG Linsheng (337)
- Application of nano-scale secondary ion mass spectrometry to microbial ecology study HU Hangwei, ZHANG Limei, HE Jizheng (348)
- Carbon cycle of urban system; characteristics, mechanism and theoretical framework ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin (358)
- Research and compilation of urban greenhouse gas emission inventory LI Qing, TANG Lina, SHI Longyu (367)

Autecology & Fundamentals

- Seed dispersal and seedling recruitment of *Ulmus pumila* woodland in the Keerqin Sandy Land, China YANG Yunfei, BAI Yunpeng, LI Jiandong (374)
- Influence of environmental factors on seed germination of *Bombax malabaricum* DC. ZHENG Yanling, MA Huancheng, Scheller Robert, et al (382)
- Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics during the decomposition of *Spartina alterniflora* and *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* litters OUYANG Linmei, WANG Chun, WANG Weiqi, et al (389)
- Home range of *Teratoscincus roborowskii* (Gekkonidae): influence of sex, season, and body size LI Wenrong, SONG Yucheng, SHI Lei (395)
- Effects of the covering behavior on food consumption, growth and gonad traits of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* LUO Shibin, CHANG Yaqing, ZHAO Chong, et al (402)
- Biological response of the rice leafhopper *Cnaphalocrocis medinalis* (Güenée) reared on rice and maize seedling to temperature LIAO Huaijian, HUANG Jianrong, FANG Yuansong, et al (409)

Population, Community and Ecosystem

- Composition and stability of organic carbon in the top soil under different forest types in subtropical China SHANG Suyun, JIANG Peikun, SONG Zhaoliang, et al (416)
- The community characteristics of different types of grassland under grazing prohibition condition ZHANG Pengli, CHEN Jun, CUI Shujuan, et al (425)
- Spatial pattern and competition relationship of *Stellera chamaejasme* and *Aneurolepidium dasystachys* population in degraded alpine grassland REN Heng, ZHAO Chengzhang (435)
- SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing' an Mountain SONG Yuan, ZHAO Xizhu, MAO Zijun, et al (443)
- The influence of vegetation restoration on soil archaeal communities in Fuyun earthquake fault zone of Xinjiang LIN Qing, ZENG Jun, ZHANG Tao, et al (454)
- Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil, China ZHU Xinyu, DONG Zhixin, KUANG Fuhong, et al (464)
- Woody plant leaf litter consumption by the woodlouse *Porcellio scaber* with a choice test LIU Yan, LIAO Yuncheng (475)
- The bacterial community of coastal sediments influenced by cage culture in Xiangshan Bay, Zhejiang, China QIU Qiongfeng, ZHANG Demin, YE Xiansen, et al (483)
- A study of meiofauna in the COMRA's contracted area during the summer of 2005 WANG Xiaogu, ZHOU Yadong, ZHANG Dongsheng, et al (492)
- Hydrologic regime of interception for typical forest ecosystem at subalpine of Western Sichuan, China SUN Xiangyang, WANG Genxu, WU Yong, et al (501)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change XIONG Wei, YANG Jie, WU Wenbin, et al (509)

Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005	HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al (519)
Combined effects of elevated O ₃ and reduced solar irradiance on growth and yield of field-grown winter wheat	ZHENG Youfei, HU Huifang, WU Rongjun, et al (532)
Resource and Industrial Ecology	
The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland	GAO Mingliang, ZHAO Wenji, GONG Zhaoning, et al (542)
Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable Lands of Heyang County in South Loess Plateau	CHEN Tao, CHANG Qingrui, LIU Jing, et al (554)
Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation	WU Ji, GUO Xisheng, LU Jianwei, et al (565)
Effects of nitrogen application stages on photosynthetic characteristics of summer maize in high yield conditions	LÜ Peng, ZHANG Jiwang, LIU Wei, et al (576)
Urban, Rural and Social Ecology	
The degradation threshold of water quality associated with urban landscape component	LIU Zhenhuan, LI Zhengguo, YANG Peng, et al (586)
Ecological sustainability in Chang-Zhu-Tan region; a prediction study	DAI Yanan, HE Xinguang (595)
The effect of exogenous nitric oxide on activities of antioxidant enzymes and microelements accumulation of two rice genotypes seedlings under cadmium stress	ZHU Hanyi, CHEN Yijun, LAO Jiali, et al (603)
Forms composition of inorganic carbon in sediments from Dali Lake	SUN Yuanyuan, HE Jiang, LÜ Changwei, et al (610)
Fractionation character and bioavailability of Cd, Pb, Zn and Ni combined pollution in oasis soil	WU Wenfei, NAN Zhongren, WANG Shengli, et al (619)
Effects of CA and EDTA on growth of <i>Chlorophytum comosum</i> in copper-contaminated soil	WANG Nannan, HU Shan, WU Dan, et al (631)
Research Notes	
Values of marine ecosystem services in Haizhou Bay	ZHANG Xiuying, ZHONG Taiyang, HUANG Xianjin, et al (640)
Variations of <i>Leymus chinensis</i> community, functional groups, plant species and their relationships with climate factors	TAN Liping, ZHOU Guangsheng (650)
The effect of N:P supply ratio on P uptake and utilization efficiencies in <i>Larix olgensis</i> Henry. seedlings	WEI Hongxu, XU Chengyang, MA Lüyi, et al (659)

《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 33 卷 第 2 期 (2013 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 2 (January, 2013)

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



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元