

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

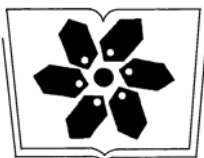
## Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 16 期 Vol.32 No.16 **2012**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 16 期 2012 年 8 月 (半月刊)

## 目 次

基于生物多样性保护的兴安落叶松与白桦最佳混交比例——以阿尔山林区为例	李 菁, 骆有庆, 石 娟 (4943)
中国能源消费碳排放的时空特征	舒娱琴 (4950)
黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子	姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河 (4961)
新疆艾比湖流域土壤有机质的空间分布特征及其影响因素	王合玲, 张辉国, 秦 璐, 等 (4969)
雅鲁藏布江山南宽谷风沙化土地土壤养分和粒度特征	李海东, 沈渭寿, 邹长新, 等 (4981)
一株溶藻细菌对海洋原甲藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 等 (4993)
种形态对黑藻和竹叶眼子菜有机酸含量的影响	钟正燕, 王宏镔, 王海娟, 等 (5002)
七项河流附着硅藻指数在东江的适用性评估	邓培雁, 雷远达, 刘 威, 等 (5014)
杭州湾滨海湿地不同植被类型沉积物磷形态变化特征	梁 威, 邵学新, 吴 明, 等 (5025)
剪形臂尾轮虫形态的时空变化及其与生态因子间的关系	葛雅丽, 席貽龙, 马 杰, 等 (5034)
太湖流域河流水质状况对景观背景的响应	周 文, 刘茂松, 徐 驰, 等 (5043)
荒漠植物白刺属 4 个物种的生殖分配比较	李清河, 辛智鸣, 高婷婷, 等 (5054)
臭氧浓度升高对香樟叶片光合色素及抗过氧化的影响及其氮素响应	牛俊峰, 张巍巍, 李 丽, 等 (5062)
不同密度下凤仙花重要形态性状与花朵数的关系	田旭平, 常 洁, 李娟娟, 等 (5071)
五种高速公路边坡绿化植物的生理特性及抗旱性综合评价	谭雪红, 高艳鹏, 郭小平, 等 (5076)
散孔材与环孔材树种枝干、叶水力学特性的比较研究	左力翔, 李俊辉, 李秧秧, 等 (5087)
北京城区行道树国槐叶面尘分布及重金属污染特征	戴斯迪, 马克明, 宝 乐 (5095)
南亚热带米老排人工林碳贮量及其分配特征	刘 恩, 刘世荣 (5103)
植物生活史型定量划分及其权重配置方法——以四棱豆生活史型划分为例	赵则海 (5110)
半干旱区湿地-干草原交错带边界判定及其变化	王 晓, 张克斌, 杨晓晖, 等 (5121)
氮肥运筹对晚播冬小麦氮素和干物质积累与转运的影响	吴光磊, 郭立月, 崔正勇, 等 (5128)
氮肥形态对冬小麦根际土壤氮素生理群活性及无机氮含量的影响	熊淑萍, 车芳芳, 马新明, 等 (5138)
基于数字相机的冬小麦物候和碳交换监测	周 磊, 何洪林, 孙晓敏, 等 (5146)
黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生长发育及产量的影响	姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 等 (5154)
基于土地破坏的矿区生态风险评价: 理论与方法	常 青, 邱 瑶, 谢苗苗, 等 (5164)
基于生态位的山地农村居民点适宜度评价	秦天天, 齐 伟, 李云强, 等 (5175)
氯虫苯甲酰胺对黑肩绿盲蝽实验种群的影响	杨 洪, 王 召, 金道超 (5184)
6 种植物次生物质对斜纹夜蛾解毒酶活性的影响	王瑞龙, 孙玉林, 梁笑婷, 等 (5191)
云南元江芒果园桔小实蝇成虫日活动规律及空间分布格局	叶文丰, 李 林, 孙来亮, 等 (5199)
重庆市蝴蝶多样性环境健康指示作用和环境监测评价体系构建	邓合黎, 马 琦, 李爱民 (5208)
<b>专论与综述</b>	
生态系统服务竞争与协同研究进展	李 鹏, 姜鲁光, 封志明, 等 (5219)
中国沿海无柄蔓足类研究进展	严 涛, 黎祖福, 胡煜峰, 等 (5230)
冰雪灾害对森林的影响	郭淑红, 薛 立 (5242)
不同干扰因素对森林和湿地温室气体通量影响的研究进展	杨 平, 仝 川 (5254)
采石场废弃地的生态重建研究进展	杨振意, 薛 立, 许建新 (5264)
<b>研究简报</b>	
基于地统计学和 CFI 样地的浙江省森林碳空间分布研究	张 峰, 杜 群, 葛宏立, 等 (5275)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 344 \* zh \* P \* ¥ 70.00 \* 1510 \* 36 \* 2012-08



封面图说: 秋色藏野驴群——秋天已经降临在海拔 4200 多米的黄河源区, 红色的西伯利亚蓼(生于盐碱荒地或砂质含盐碱土壤)铺满大地, 间有的高原苔草也泛出了金黄, 行走在上面的藏野驴们顾不上欣赏这美丽的秋色, 只是抓紧时间, 在严冬到来之前取食, 添肥增膘以求渡过青藏高原即将到来的漫长冬天。

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

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 16 August, 2012 (Semimonthly)

## CONTENTS

The optimum mixture ratio of larch and birch in terms of biodiversity conservation; a case study in Aershan forest area .....	LI Jing, LUO Youqing, SHI Juan (4943)
Spatiotemporal characteristics of carbon emissions from energy consumption in China .....	SHU Yuqin (4950)
Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China .....	YAO Xueling, FU Bojie, LÜ Yihe (4961)
The characteristics of the spatial distribution of soil organic matter and factors influencing it in Ebinur Lake Basin of Xinjiang Autonomous Region, China .....	WANG Heling, ZHANG Huiguo, QIN Lu, et al (4969)
Soil nutrients content and grain size fraction of aeolian sandy land in the Shannan Wide Valley of the Yarlung Zangbo River, China .....	LI Haidong, SHEN Weishou, ZOU Changxin, et al (4981)
Algicidal activity against <i>Prorocentrum micans</i> by a marine bacterium isolated from a HABs area, South China .....	SHI Rongjun, HUANG Honghui, QI Zhanhui, et al (4993)
Effects of arsenic speciations on contents of main organic acids in <i>Hydrilla verticillata</i> and <i>Potamogeton malaianus</i> .....	ZHONG Zhengyan, WANG Hongbin, WANG Haijuan, et al (5002)
Exploration of benthic diatom indices to evaluate water quality in rivers in the Dongjiang basin .....	DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al (5014)
Phosphorus fraction in the sediments from different vegetation type in Hangzhou bay coastal wetlands .....	LIANG Wei, SHAO Xuexin, WU Ming, et al (5025)
Spatio-temporal variation of morphometric characteristics of <i>Brachionus forficula</i> in relation to ecological factors .....	GE Yali, XI Yilong, MA Jie, et al (5034)
Response of river water quality to background characteristics of landscapes in Taihu Lake basin .....	ZHOU Wen, LIU Maosong, XU Chi, et al (5043)
Reproductive allocation in four desert species of the genus <i>Nitraria</i> L. ....	LI Qinghe, XIN Zhiming, GAO Tingting, et al (5054)
Effects of elevated ozone on foliar chlorophyll content and antioxidant capacity in leaves of <i>Cinnamomum camphora</i> under enhanced nitrogen loads .....	NIU Junfeng, ZHANG Weiwei, LI Li, et al (5062)
Correlation analysis between floret numbers and important traits of <i>Impatiens balsamina</i> under different planting density .....	TIAN Xuping, CHANG Jie, LI Juanjuan, et al (5071)
Physiological characteristics and comprehensive evaluation of drought resistance in five plants used for roadside ecological restoration .....	TAN Xuehong, GAO Yanpeng, GUO Xiaoping, et al (5076)
Comparison of hydraulic traits in branches and leaves of diffuse- and ring-porous species .....	ZUO Lixiang, LI Junhui, LI Yangyang, et al (5087)
Distribution and heavy metal character of foliar dust on roadside tree <i>Sophora japonica</i> of urban area in Beijing .....	DAI Sidi, MA Keming, BAO Le (5095)
The research of carbon storage and distribution feature of the <i>Mytilaria laosensis</i> plantation in south sub-tropical area .....	LIU En, LIU Shirong (5103)
The novel methods of quantitative classification of plant life cycle forms and weight collocation; taking classification of life cycle forms of <i>Psophocarpus tetragonolobus</i> as an example .....	ZHAO Zehai (5110)
Research on boundary definition and changes of wetland-dry grassland ...	WANG Xiao, ZHANG Kebin, YANG Xiaohui, et al (5121)
Differential effects of nitrogen managements on nitrogen, dry matter accumulation and transportation in late-sowing winter wheat .....	WU Guanglei, GUO Liyue, CUI Zhengyong, et al (5128)
Effects of nitrogen form on the activity of nitrogen bacteria group and inorganic nitrogen in rhizosphere soil of winter wheat .....	XIONG Shuping, CHE Fangfang, MA Xinming, et al (5138)
Using digital repeat photography to model winter wheat phenology and photosynthetic CO <sub>2</sub> uptake .....	ZHOU Lei, HE Honglin, SUN Xiaomin, et al (5146)
Impacts of climate change on growth and yield of winter wheat in the semi-humid region of the Loess Plateau .....	YAO Yubi, WANG Runyuan, YANG Jinhu, et al (5154)
Theory and method of ecological risk assessment for mining areas based on the land destruction .....	CHANG Qing, QIU Yao, XIE Miaomiao, et al (5164)
Suitability evaluation of rural residential land based on niche theory in mountainous area .....	QIN Tiantian, QI Wei, LI Yunqiang, et al (5175)
Effects of chlorantraniliprole on experimental populations of <i>Cyrtorhinus lividipennis</i> (Reuter) (Hemiptera: Miridae) .....	YANG Hong, WANG Zhao, JIN Daochao (5184)
Effects of six plant secondary metabolites on activities of detoxification enzymes in <i>Spodoptera litura</i> .....	WANG Ruilong, SUN Yulin, LIANG Xiaoting, et al (5191)
Daily activity and spatial distribution pattern of the oriental fruit fly, <i>Bactrocera dorsalis</i> (Diptera: Tephritidae) in mango orchard, Yuanjiang, Yunnan .....	YE Wenfeng, LI Lin, SUN Lailiang, et al (5199)
The establishment of the indication on environmental health of butterfly and of the environmental monitoring evaluation system in Chongqing .....	DENG Heli, MA Qi, LI Aimin (5208)
<b>Review and Monograph</b>	
Research progress on trade-offs and synergies of ecosystem services; an overview .....	LI Peng, JIANG Luguang, FENG Zhiming, et al (5219)
A review on the balanomorph barnacles in the coastal waters of China .....	YAN Tao, LI Zufu, HU Yufeng, et al (5230)
Effects of ice-snow damage on forests .....	GUO Shuhong, XUE Li (5242)
Greenhouse gas flux from forests and wetlands; a review of the effects of disturbance .....	YANG Ping, TONG Chuan (5254)
Advances in ecology restoration of abandoned quarries .....	YANG Zhenyi, XUE Li, XU Jianxin (5264)
<b>Scientific Note</b>	
Spatial distribution of forest carbon in Zhejiang Province with geostatistics based on CFI sample plots .....	ZHANG Feng, DU Qun, GE Hongli, et al (5275)

DOI: 10.5846/stxb201109051304

姚玉璧,王润元,杨金虎,张谋草,岳平,肖国举. 黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生长发育及产量的影响. 生态学报, 2012, 32(16): 5154-5163.

Yao Y B, Wang R Y, Yang J H, Zhang M C, Yue P, Xiao G J. Impacts of climate change on growth and yield of winter wheat in the semi-humid region of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 5154-5163.

## 黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦 生长发育及产量的影响

姚玉璧<sup>1,2,\*</sup>, 王润元<sup>1</sup>, 杨金虎<sup>2</sup>, 张谋草<sup>2</sup>, 岳平<sup>1</sup>, 肖国举<sup>3</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020; 2. 甘肃省定西市气象局, 定西 743000; 3. 甘肃省庆阳市气象局, 西峰 745000; 4. 宁夏大学新技术应用研究开发中心, 银川 750021)

**摘要:** 利用黄土高原半湿润区西峰农业气象试验站冬小麦生长发育定位观测资料、加密观测和对应平行气象观测资料, 分析气候变化对冬小麦生长发育的影响, 以及冬小麦穗干重生长与气象条件的关系。结果表明, 研究区域降水量年际变化呈波动变化, 20 世纪 90 年代降水量最少。降水量存在 3.8a 的年际周期变化。气温年际变化呈上升趋势, 气温变化曲线线性拟合倾向率为 0.325℃/10a。作物生长季干燥指数呈显著上升趋势, 干燥指数变化曲线线性拟合倾向率为 0.069/10a, 20 世纪 90 年代至 2010 年明显趋于暖干化。受气候变暖的影响, 冬小麦播种期每 10 a 推后 2—3d, 返青期每 10a 提前 4—5 d, 开花期和成熟期每 10a 提前 5—6 d。冬小麦越冬期每 10a 缩短 5—6 d、全生育期每 10a 缩短 7—8 d。冬小麦返青后第 83 天开始, 穗干重的生长由缓慢转为迅速生长阶段, 从返青后第 101 天开始, 其生长从迅速生长又转为缓慢生长, 在返青后的第 87 天, 穗的干物质积累速度最大。由于气候变暖, 冬小麦生育期大部分时段热量充足。播种—越冬前和拔节—开花期产量对气温变化的响应十分敏感; 降水量的影响函数同温度的影响函数呈反相位分布, 除成熟期降水量对产量形成负效应外, 其余时段降水量对产量影响均为正效应, 而在冬小麦播种期和返青—拔节期产量对降水量变化的响应也十分敏感。

**关键词:** 黄土高原; 气候变化; 冬小麦; 生育; 穗干重

## Impacts of climate change on growth and yield of winter wheat in the semi-humid region of the Loess Plateau

YAO Yubi<sup>1,2,\*</sup>, WANG Runyuan<sup>1</sup>, YANG Jinhui<sup>2</sup>, ZHANG Moucao<sup>3</sup>, YUE Ping<sup>1</sup>, XIAO Guojun<sup>4</sup>

1 Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, China Meteorological Administration, Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China

2 Meteorological Bureau of Dingxi County, Gansu Province, Dingxi 743000, China

3 Meteorological Bureau of Qingyang City, Gansu Province, Xifeng 745000, China

4 New Technology Application Research and Development Centre, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

**Abstract:** Winter wheat growth and meteorological observation data in a semi-humid region of the Loess Plateau are used to analyze the effects of climatic change on winter wheat growth, and the relationship between ear dry weight growth of winter wheat and meteorological conditions. Results show that the interannual trend of precipitation in the study region fluctuated,

**基金项目:** 国家重大科学研究计划(2012CB955304); 国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106029, GYHY200806021); 国家自然科学基金重点项目(40830957); 中国气象局气候变化专项(280200S011C00); 甘肃省气象局第五批“十人计划”项目; 干旱气象科学研究基金项目(IAM201111)

收稿日期: 2011-09-05; 修订日期: 2012-04-17

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

and was a minimum in the 1990s. An interannual periodic change of 3 a and 8 a was observed. The interannual temperature trend was upward, and a linear fit of this trend produced a rate of  $0.325\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ . The crop aridity index during the growing season showed a marked upward trend, with a linear fit giving a rate  $0.069/10\text{ a}$ . There was a significant drying and warming tendency from the beginning of the 1990s through 2010. Because of climate warming, the sowing time of winter wheat would be postponed by  $2\text{--}3\text{ d}/10\text{ a}$ . Reviving time would advance by  $4\text{--}5\text{ d}/10\text{ a}$ , and flowering and maturing times by  $5\text{--}6\text{ d}/10\text{ a}$ . Overwintering days would be reduced by  $5\text{--}6\text{ d}/10\text{ a}$ , and the entire growth period would shorten by  $7\text{--}8\text{ d}/10\text{ a}$ . Growth speed of ear dry weight was much greater on the 83<sup>rd</sup> day after reviving, and then reverted to a slow speed on the 101<sup>st</sup> day after reviving. The highest ear dry material speed was on the 87<sup>th</sup> day after reviving. Because of climate warming, the amount of heat was abundant in most of the winter wheat growing period. The yield was very sensitive to climate change during the period between sowing and just before winter, as well as between the jointing and flowering stages. Every  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  increment in average temperature per ten days could decrease the yield of winter wheat by  $10\text{--}15\text{ g}/\text{m}^2$ . Sensitive periods are  $20\text{--}25\text{ d}$  and  $30\text{--}40\text{ d}$ . The precipitation influence and heat functions showed an opposite phase, except for the maturation stage, precipitation was positively correlated with yield. Yield was also very sensitive to precipitation change during the seeding and reviving-jointing stages. Every  $1\text{ mm}$  increment in precipitation per ten days would increase yield by  $15\text{--}20\text{ g}/\text{m}^2$ . Sensitive periods are  $20\text{--}25\text{ d}$  and  $50\text{--}60\text{ d}$ . Abundant solar illumination during the overwintering stage would improve cold resistance training, and it had a strongly positive effect on yield during the postulation period. Every  $1\text{ h}$  increment in sunshine duration per ten days would augment yield by  $5\text{--}10\text{ g}/\text{m}^2$ . The sensitive period is  $25\text{--}35\text{ d}$ . Long sunshine duration would aid the accumulation of dry materials.

**Key Words:** the Loess Plateau; climate change; winter wheat; growth; ear dry weight

气候系统的变暖已经是“明确的”事实,而且气候变暖已对许多自然和生物系统产生了可辨别的影响<sup>[1]</sup>。在中高纬度地区,如果局地温度增高 $1\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,粮食产量预计会有少量增加;若升温幅度超过这一范围,某些地区农作物产量则会降低<sup>[2]</sup>。1982—1998年温度渐增造成美国玉米、大豆产量发生变化<sup>[3]</sup>。1992—2003年,在菲律宾水稻生长季内的干旱月份(1—4月)的最低气温每增加 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,水稻产量下降 $10\%$ <sup>[4]</sup>。1961—2000年间德国的气温增加导致大田作物的物候期发生了很大变化<sup>[5]</sup>。

粮食生产和农业系统对气候变化的响应十分敏感,气候变化将使中国未来农业生产的不稳定性增加、产量波动增大<sup>[6-8]</sup>、种植熟制变化增加<sup>[9-10]</sup>。气温上升导致我国作物的气候生长期已明显延长,平均延长了约 $10\text{ d}$ 左右,青藏高原和北方地区尤为显著<sup>[11-12]</sup>。冬季气温升高对越冬作物特别是冬小麦生长发育产生了较大影响。在近20a(1986—2003年),北方冬小麦越冬死亡率下降到 $2\%$ 以下,越冬天数缩短少了 $7\text{--}8\text{ d}$ ,整个生育期缩短 $8\text{--}10\text{ d}$ ,返青—开花期天数延长 $7\text{ d}$ ,这些变化有利于冬小麦生产及气候资源的利用。另一方面,冬季气温升高及降水量减少也使冬小麦产量稳定性变差,麦田病虫害发生率增大,给冬小麦生产增加了不确定因素<sup>[13]</sup>。冬春气温显著升高导致越冬期土壤水分损耗增大,春旱加剧,不利于春季作物返青和种植<sup>[14]</sup>。中国黄土高原区域对气候变暖的响应更为敏感,对气候变化的适应能力更为脆弱,受气候变暖的影响程度会更大,对农业生产所造成的损失也更严重<sup>[15-17]</sup>。气候变暖通过对农业气候条件的改变直接或间接地影响到包括农作物生长、种植制度、栽培方式、作物产量和品质、气候生产力、病虫害等在内的各个方面。因此,气候变化对作物的影响及应对技术研究,是中国黄土高原现代农业发展亟待考虑的重要科学课题<sup>[18-22]</sup>。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验在位于西北黄土高原的甘肃省庆阳市西峰农业气象试验站进行,地理坐标 $35^{\circ}44'\text{N}$ ,  $107^{\circ}38'\text{E}$ ;海拔高度 $1421.0\text{ m}$ ;该站地处著名的黄土高原董志塬腹地,董志塬塬面面积 $910\text{ km}^2$ ,黄土层厚度在 $200\text{ m}$ 以上,是保存面积最大的典型黄土高原塬区。研究区域气候属黄土高原半湿润气候区,年均气温 $9.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最热月(7

月)平均气温 21.4℃,最冷月(1月)平均气温-4.2℃;年降水量 528.2 mm,6—8 月降水量(278.1 mm)占年降水量的 52.7%;春季和秋季降水量接近,分别为 101.5、131.7 mm,冬季降水量最少,为 16.9 mm;雨热同季;年太阳总辐射为 5547.3 MJ/m<sup>2</sup>,年均日照时数 2445.9 h。

## 1.2 试验设计与观测

1980—2010 年连续进行冬小麦生长发育及产量形成的定位观测试验。试验取样地段为旱作地段、未灌溉,品种及耕作管理措施与大田相同,试验取样地段、品系、种植方法等均长期一致。观测方法按照中国气象局农业气象观测规范<sup>[23]</sup>,设计 4 个小区,作为 4 个重复,观测发育期、生长高度、密度、叶面积、叶、茎和穗的生长量、干物质和产量等要素;2007、2008 年增加观测次数,逢 3、逢 5、逢 8、逢 10 日加密观测;试验取样地段毗邻西峰国家基准气候站地面气象观测场,符合农业气象平行观测要求,故同期对比观测气象资料为该站地面气象观测资料。

冬小麦大田区域产量采用西峰区 1981—2010 年产量资料。历年气候变化分析资料利用西峰国家基准气候站 1951—2010 年地面气象观测资料。

## 1.3 研究方法

气候要素的趋势变化采用气候倾向率<sup>[24]</sup>来表示。用  $X_i$  表示样本量为  $n$  的某一气候变量,用  $t_i$  表示  $X_i$  所对应的时间,建立  $X_i$  与  $t_i$  之间的一元线性回归方程:  $X_i = a + bt_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 式中  $a$  为回归常数;  $b$  为回归系数。 $a$  和  $b$  可用最小二乘法进行估计。以  $b$  的 10 倍作为气候要求的气候倾向率。

小波分析不仅能反映信号在时频域上的总体特征还能提供局部化的信息,既可给出信号变化的时间尺度,也可以显示出信号变化的时间位置,还具有对突变点的诊断能力。由于上述特点,小波分析已在许多领域得到广泛的应用。小波基(母波)的种类较多,本文采用有边界 Morlet 小波能量谱分析气象要素的周期变化特征<sup>[25]</sup>。

作物生长季(4—10 月)干燥指数( $G$ )公式如下:

$$G = \frac{C \sum T_{4-10}}{R}$$

式中,  $\sum T_{4-10}$  为作物生长季(4—10 月)  $\geq 0$ ℃ 积温;  $C$  为海拔高度订正系数;  $C \sum T_{4-10}$  表示蒸发力(一般用 Penman-Monteith 公式估算,本文使用该方法,主要用于时间序列的趋势特征分析)。  $R$  为同期降水量<sup>[26]</sup>。  $G$  越大说明越干燥,反之越湿润;

对冬小麦产量资料采用多项式拟合进行处理,从实际产量中分离出气候产量和社会产量,用气候产量能比较客观地反映出产量在不同气象条件下波动状况。

气候产量与气象要素间的积分回归模式<sup>[25]</sup>为:

$$Y = c_0 + \int_0^T a(t)x(t)dt$$

式中,  $Y$  为气候产量;  $c_0$  为积分常量;  $x(t)$  为气象要素;  $a(t)$  为影响函数或偏回归系数,其值可以鉴别生长期不同时段气象条件对作物生长发育和产量形成的贡献。

采用 Excel 2003 软件进行相关分析、通径分析以及绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 气候变化特征

#### 2.1.1 降水量

1951—2010 年,研究区年降水量年际变化呈波动下降趋势,其气候倾向率为 -8.915 mm/10a (图 1),但未通过显著性检验。冬季降水量呈略增趋势,倾向率为 -1.154 mm/10a ( $P < 0.09$ )。其余季节变化未通过显著性检验。降水量季节变幅冬季最大,变异系数达 55.7%;秋季、春季次之,变异系数分别为 46.2%、44.6%;夏季最小,变异系数为 27.4% (表 1)。

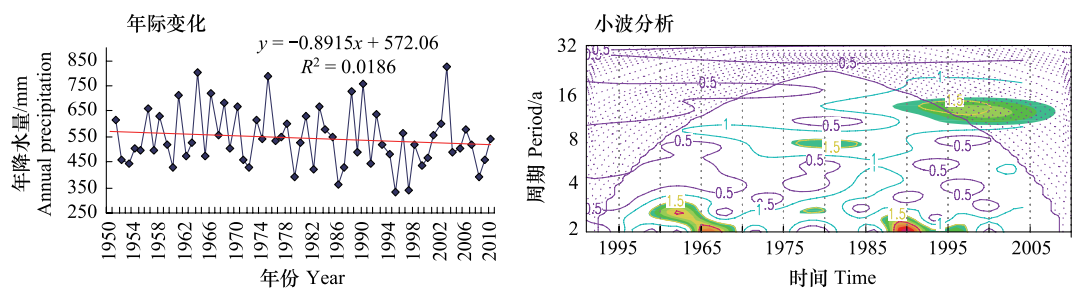


图1 研究区降水量变化曲线

Fig.1 Annual Precipitation change Curve in the study area

就研究区年代际降水距平百分率而言,20 世纪 60 年代较平均降水量偏多 12.6%,80 年代次之,为 3.5%,70 年代和 21 世纪最初 10a 代接近平均值;20 世纪 90 年代和 50 年代分别偏少-13.0%、-3.6%(表 2)。降水量年代际变幅 80 年代最大,变异系数为 24.1%;21 世纪 10 年代次之,变异系数为 21.2%;50 年代最小,变异系数为 15.3%。

表 1 研究区各季节降水量、气温倾向率

Table 1 The ration of trend precipitation and temperature in seasons in the study area							
要素 Factor		年 Year	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	生长季(4—10 月) Growth period
降水 precipitation	倾向率 ration of trend/( mm/10a)	-8.915	-5.126	0.289	-4.546	1.154△	-7.378
	变异系数 Coefficient of variability/%	21.0	44.6	27.4	46.2	55.7	22.7
气温 Temperature	倾向率 ration of trend/(℃/10a)	0.325★	0.365★	0.159▲	0.295★	0.463★	0.255★
	变异系数 Coefficient of variability/%	9.4	11.8	3.7	10.4	-41.7	4.5
△ <i>P</i> <0.10, ▲ <i>P</i> <0.05, ★ <i>P</i> <0.01							

表 2 研究区各年代降水距平百分率、气温距平

Table 2 Every decadal anomaly percent of precipitation and temperature departure in the study area							
要素 Factor		20 世纪 50 年代 1950s	20 世纪 60 年代 1960s	20 世纪 70 年代 1970s	20 世纪 80 年代 1980s	20 世纪 90 年代 1990s	21 世纪 10 年代 2000s
降水量	距平百分率 Anomaly percent/%	-3.6	12.6	-0.1	3.5	-13.0	0.5
Precipitation	变异系数 Coefficient of variability/%	15.3	19.4	20.7	24.1	19.7	21.2
气温	距平 Departure/℃	-0.4	-0.7	-0.4	-0.4	0.4	1.2
Temperature	变异系数 Coefficient of variability/%	4.6	6.3	5.9	6.7	7.3	4.4

用有边界小波能量谱分析方法对降水量的年际周期振荡特征进行分析,结果表明,研究区降水量存在 3、8a 的年际周期变化,在 1955 年之后 3a 周期能量谱周期振荡逐渐加强,3a 周期振荡在 1963 年为中心的局部时段内最强,之后逐渐减弱。8a 振荡在 1980 年为中心的局部时段内最强(图 1)。

2.1.2 气温

1951—2010 年,研究区气温呈显著上升趋势(图 2),其气候倾向率为 0.325℃/10a ( $P<0.01$ )。气温的 3 阶拟合方程(Cubic 函数)呈先降后升型,方程为  $y = -0.000005x^3 + 0.0018x^2 - 0.0644x - 0.0612$ ,其线性化后的相关系数  $R=0.823$ ,通过  $\alpha=0.01$  检验。对拟合方程求一阶导数,令  $dy/dx=0$ ,求得 1970 年为气温拟合函数最小值即转折点,1970 年后气温持续上升。

年平均气温距平 20 世纪 50 年代、60 年代、70 年代、80 年、90 年代、21 世纪 10 年代分别为-0.4℃、-0.7℃、-0.4℃、-0.4℃、0.4℃、1.2℃。可见从 20 世纪 60 年代开始年代际距平逐渐上升,21 世纪最初 10 年气温距平最大,达 1.2℃。20 世纪 90 年代平均气温变幅最大,变异系数为 7.3%,80 年代次之,变异系数为 6.7%。

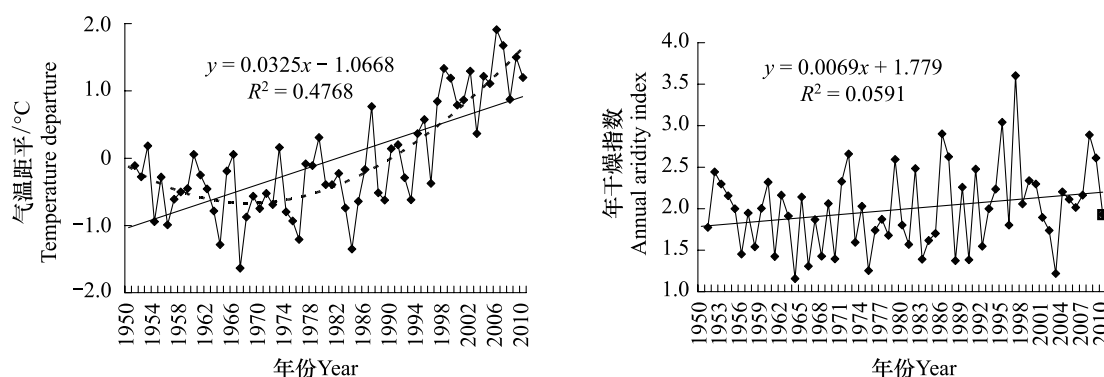


图2 研究区气温距平、干燥指数年际变化曲线

Fig. 2 Interannual change curve of temperature departure and aridity index in the study area

根据世界气象组织(WMO)规定:正距平大于或等于两个标准差为异常暖;负距平小于或等于两个标准差为异常冷。正距平大于或等于一个标准差划分为暖年;负距平小于或等于一个标准差划分为冷年。研究区域异常暖年为2006、2007年;暖年为1997—2002、2004—2005、2008—2010年,其中暖年和异常暖年均出现在1997年之后;异常冷年为1967年,冷年为1954、1956、1963—1964、1967—1968、1970、1974—1976、1984年。

研究期间,研究区冬季平均气温的倾向率最大,达 $0.463^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,春、秋次之,分别为 $0.365$ 、 $0.295^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ;夏季较小,为 $0.159^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ;作物生长季4—10月的气温明显增暖,其倾向率为 $0.255^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。气温季节变幅冬季最大,变异系数达 $41.7\%$ ;春、秋季次之,变异系数为 $11.8\%$ 、 $10.4\%$ ;夏季最小,变异系数为 $3.7\%$ 。

### 2.1.3 作物生长季干燥指数

1951—2010年,研究区域作物生长季干燥指数呈显著上升趋势(图2),其气候倾向率为 $0.069/10\text{a}$  ( $P < 0.05$ )。

1963—1971年为研究区相对湿润期,20世纪70年代至80年代干湿交替,干燥指数呈先上升,而后有所下降,再上升的过程;20世纪90年代初至2010年趋于暖干化,干燥指数明显上升。

## 2.2 气候变化对冬小麦发育期的影响

1980—2010年,冬小麦越冬期间隔日数年际变化曲线呈逐年减小的趋势(图3),线性拟合倾向率为 $-5.095\text{d}/10\text{a}$ ,相关系数 $r=0.452$ ,通过 $\alpha=0.01$ 检验。即每10a缩短5—6d。越冬期间隔日数与11月—翌年3月平均气温呈极显著负相关,相关系数 $r=-0.685$ ,通过 $\alpha=0.001$ 检验,即11月—翌年3月气温升高,冬小麦越冬期间隔日数缩短。另外,越冬期间隔日数与11月、翌年2月和3月的平均气温相关性更高,相关系数为 $r=-0.759$ ,通过 $\alpha=0.001$ 检验。可见影响冬小麦越冬的主要气候因素是11月、翌年2月和3月的气温。

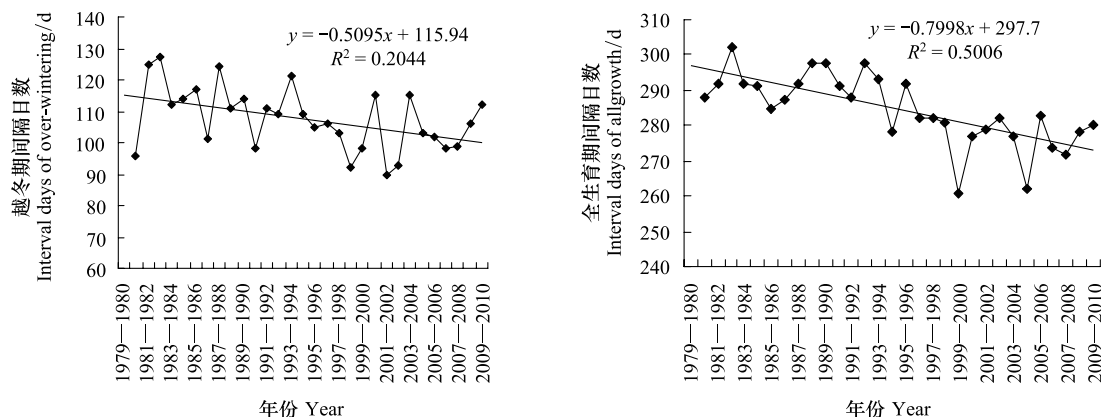


图3 冬小麦发育期间隔日数的年际变化曲线

Fig. 3 Curve of growth interval days of Winter wheat

从播种—成熟,冬小麦全生育期年际变化曲线也呈逐年减小的趋势(图3),线性拟合倾向率为 $-7.998\text{d}/10\text{a}$ ,相关系数 $r=0.708$ ,通过 $\alpha=0.001$ 检验。即每10 a 缩短7—8 d。冬小麦全生育期间隔日数与8月—翌年6月平均气温呈极显著的负相关,相关系数 $r=-0.772$ ,通过 $\alpha=0.001$ 检验,即8月—翌年6月气温升高,冬小麦全生育期间隔日数缩短。

可见,由于气候变暖,使冬小麦越冬期每10 a 缩短5—6 d、全生育期每10 a 缩短7—8 d。其生物学机理是气温增高使冬小麦停止生长期缩短,营养生长阶段加快,全生育期缩短。

### 2.3 冬小麦穗的干物质积累特征

冬小麦生物量在返青到成熟的动态生长呈“缓慢生长-积极生长-缓慢生长”的生长过程。它的特点是开始生长较为缓慢,以后随着时间的推移,在某一段时间内增长速度很快,当达到某一阶段后,生长速度又趋于缓慢,直至最后停止生长。2007、2008年每2日加密测定冬小麦穗干重并建立穗的干物质积累曲线(图4)。

图4中穗的干物质积累进程中有个别数据出现穗干重下降或停滞,其原因为取样的误差,其误差在数据控制允许误差范围内。

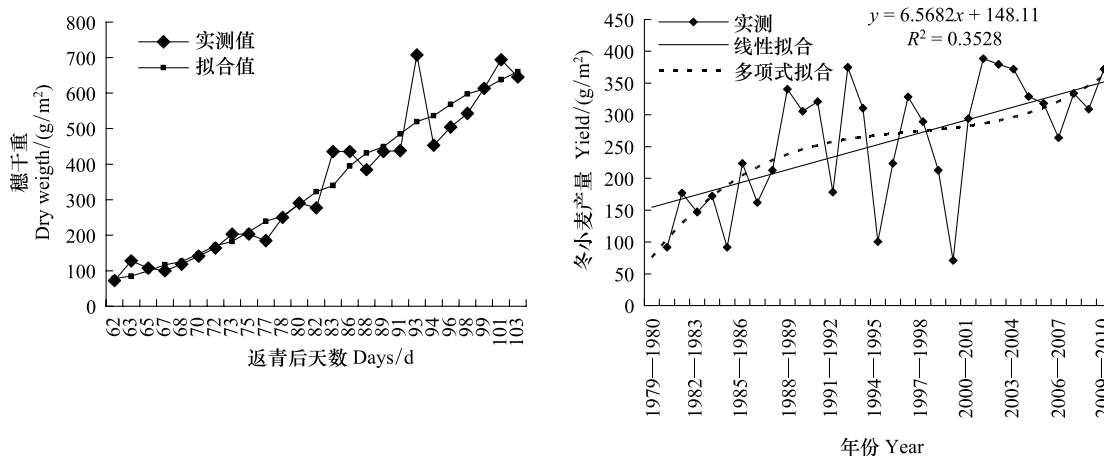


图4 冬小麦穗干重生长发育和产量变化曲线

Fig.4 Curve of growth of ears dried weight and annual Winter wheat yields

穗的干物质积累曲线拟合方程为：

$$y = \frac{809.152}{1 + e^{(7.876 - 0.091x)}}$$

其线性化后相关系数为 $R=0.951$ ,方差分析 $F=219.624$ ,通过 $\alpha=0.01$ 信度检验。

对冬小麦穗的干物质积累拟合函数求一阶导数,可得穗的生长速度函数为:

$$v = \frac{dy}{dx} = \frac{kbe^{a-bx}}{(1 + e^{a-bx})^2} = \frac{11.04e^{(7.876-0.091x)}}{(1 + e^{(7.876-0.091x)})^2}$$

对生长速度函数求一阶导数,令 $\frac{dv}{dx}=0$ ,可求得 $x=86.5 \approx 87(\text{d})$ 时,穗的生长速度最大为: $v_{\max}=18.4\text{g}/(\text{m}^2\text{d})$ 。即在返青后的第87天,穗的干物质积累速度最大可达 $18.4\text{g}/\text{m}^2\text{d}$ 。

对穗的生长速度函数求二阶导数得:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{d^3y}{dx^3} = kb^3e^{a-bx} \frac{1 - 4e^{a-bx} + e^{2a-2bx}}{(1 + e^{a-bx})^4}$$

令 $\frac{d^2v}{dx^2}=0$ ,即 $1 - 4e^{a-bx} + e^{2a-2bx}=0$ ,求函数的两个特征点,解得:

$$x_1 = \frac{a - \ln(2 + \sqrt{3})}{b} = 83.1 \approx 83(\text{d}), \quad x_2 = \frac{a - \ln(2 - \sqrt{3})}{b} = 101.0 \approx 101(\text{d})$$

式中,  $x_1$  表示穗由缓慢生长转为积极生长的转折时间,  $x_2$  表示由积极生长转为缓慢生长的转折时间。即穗生长从返青后 83 d 开始, 由缓慢生长转为迅速生长阶段, 从返青后第 101 天开始, 其生长从迅速生长又转为缓慢生长。穗的干物质迅速积累期为 18 d。

需要说明的是, 穗干重累积曲线及其导数式是利用研究区农业气象试验站观测资料的统计分析结果, 在实际生产中, 不同产量水平会有不同的拟合结果, 但基本数学形式相同, 只是参数会改变。

## 2.4 冬小麦产量与气候变化的关系

1980—2010 年, 研究区冬小麦产量的年变化方程为:

$$y = 0.0307x^3 - 1.6947x^2 + 33.264x + 44.034$$

式中,  $y$  为年产量,  $x$  为时间序列, 从 1 开始, 其线性化后的相关系数  $R=0.628$  ( $P<0.01$ )。

冬小麦气候产量与秋季平均气温呈负相关 ( $r=-0.279$ ,  $P<0.10$ ) (表 3), 秋季气温偏高, 冬前积温过多, 造成冬小麦冬前苗情徒长, 过度消耗养分和水分, 降低抗逆能力和抗冻能力, 造成小麦减产。与 5 月最高气温平均呈负相关 ( $r=-0.404$ ,  $P<0.05$ ), 5 月为冬小麦抽穗—开花期, 此时段最高气温偏高影响开花授粉结实, 进而影响产量。与 6 月上中旬日照时数呈正相关 ( $r=0.404$ ,  $P<0.05$ ), 6 月上中旬正值冬小麦灌浆期, 日照充足, 有利于干物质形成积累, 增加产量。与播种期前后 8—9 月降水量呈正相关 ( $r=0.605$ ,  $P<0.01$ ), 8—9 月降水充足, 则播种期墒情好, 冬小麦出苗齐, 苗全苗壮, 为增产奠定基础。与返青—拔节期 2—4 月降水量呈正相关 ( $r=0.527$ ,  $P<0.01$ ), 返青—拔节期 2—4 月是该区域冬春季干旱易出现时段, 此时段是冬小麦需水的关键期, 2—4 月降水充足, 促进冬小麦起身拔节, 有利于营养生长。

表 3 不同气候因子影响冬小麦产量的相关系数与直接通径系数

Table 3 Correlation coefficients and direct path coefficients of Winter wheat yields against different climatic factors

气候要素 Climate factor	秋季平均气温/℃ Temperature of autumn	5 月最高 气温平均/℃ mean maximum temperature in May	6 月上中旬 日照时数/h Sunshine in first ten-day to mid ten-day of June	8—9 月降水量/mm Precipitation in August to September	2—4 月降水量/mm Precipitation in February to April
相关系数 Correlation coefficient	-0.279 <sup>△</sup>	-0.404 <sup>▲</sup>	0.404 <sup>▲</sup>	0.605 <sup>★</sup>	0.527 <sup>★</sup>
直接通径系数 Direct path coefficients	0.042	0.003	0.122	0.567	0.472

△ $P<0.10$ , ▲ $P<0.05$ , ★ $P<0.01$

统计分析表明, 秋季气温升高, 冬前积温过多, 造成冬小麦冬前苗情徒长; 冬季气温显著升高导致越冬期土壤水分损耗增大, 冬春旱加剧, 春季气温升高影响作物营养生长, 均不利于冬小麦生长发育和产量形成。

为明确各气候因子分别对冬小麦产量的直接贡献大小并确定关键气候因子, 将各气候因子与冬小麦产量进行通径分析, 结果显示, 气候因子对研究区冬小麦产量的作用由大到小依次为: 播种期前后 8—9 月降水量 > 返青—拔节期 2—4 月降水量 > 6 月上中旬日照时数 > 冬前秋季平均气温 > 5 月最高气温平均。其中播种期前后 8—9 月降水量和返青—拔节期 2—4 月降水量的直接通径系数远大于其他气候因子。

可见, 研究区域播种期前后 8—9 月降水量和返青—拔节期 2—4 月降水量是关键影响因子; 冬前秋季气温偏高和 5 月最高气温则是冬小麦生育及产量形成的主要限制因子。

## 2.5 气象要素对产量的影响及敏感性

### 2.5.1 热量对冬小麦产量的影响及敏感性

播种到幼苗期气温对产量影响为负效应, 温度偏高对作物不利, 旬平均气温每升高 1℃, 冬小麦产量降低 10—15 g/m<sup>2</sup>, 敏感期持续 20—25 d (图 5)。幼苗期气温偏高, 会造成冬小麦苗期徒长, 过度消耗养分和水分, 降低抗逆性, 影响产量。

入冬前的 11 月到初冬的 12 月气温都是正效应, 表明这段时期温度偏高有利养分积累和抗寒锻炼。

拔节—开花期气温对产量影响为负效应, 旬平均气温每升高 1℃, 冬小麦产量降低 10—15 g/m<sup>2</sup>, 敏感期约 30—40 d。气温升高一方面加剧了土壤蒸发和作物蒸腾, 农田蒸散量增加促使作物需水量增加, 导致农田

作物缺水加重;另一方面,拔节到开花气温偏高缩短了穗分化期,使小花结实率下降,进而影响产量结构。

成熟期气温对冬小麦产量形成为正效应,旬平均气温每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ,冬小麦产量可增加  $10\text{—}15\text{ g/m}^2$ 。其原因是成熟期温度偏高有利于籽粒迅速干燥和加快收获进度减少损失,而此时温度偏低往往对应多阴雨天气不利收获脱粒。

### 2.5.2 降水量对冬小麦产量的影响及敏感性

除成熟期降水量对冬小麦产量形成为负效应外,其余时段降水量对冬小麦产量形成均为正效应,在冬小麦播种期产量对降水量变化响应十分敏感,旬降水量每增加  $1\text{ mm}$ ,冬小麦产量可增加  $15\text{—}20\text{ g/m}^2$ ,敏感期持续  $20\text{—}25\text{ d}$ (图 5)。播种期降水充足,冬小麦苗全苗壮。

返青—拔节期产量对降水量变化的响应也十分敏感,旬降水量每增加  $1\text{ mm}$ ,冬小麦产量可增加  $15\text{—}20\text{ g/m}^2$ ,敏感期约  $50\text{—}60\text{ d}$ 。降水增加,促进冬小麦营养生长,还可促进小花分化,提高小穗结实率。之后影响减弱,成熟期降水量对冬小麦产量形成又转为负效应,此时段降水过多,籽粒易因呼吸消耗和雨水淋洗而降低产量。

### 2.5.3 光照对冬小麦产量的影响及敏感性

冬前到初冬光照对产量影响为正效应;旬日照时数每增加  $1\text{ h}$ ,冬小麦产量增加  $4\text{—}5\text{ g/m}^2$ ,敏感期为  $20\text{—}30\text{ d}$ (图 5)。表明光照充足有利于冬前抗寒锻炼。

光照对冬小麦灌浆期产量形成具有显著的正效应;旬日照时数每增加  $1\text{ h}$ ,冬小麦产量增加  $5\text{—}10\text{ g/m}^2$ ,敏感期为  $25\text{—}35\text{ d}$ ;光照充足有利于干物质形成积累。成熟期光照仍存在正效应反映了晴天有利于收获。

一般情况下,当其他生态气候条件适宜时,光照增加,光合作用加快,对植物发育应为正效应。但当某一时段日照时数增多时,相应时段常常表现为降水减少的状况,由于水分不足影响产量形成,故播种期、返青—拔节期等时段的日照时数变化对产量影响也会表现为负效应。

## 2.6 冬小麦产量气候模型

分析冬小麦生长关键时段、关键气象因子对其产量的影响,依据积分回归及相关分析结果,建立冬小麦产量的气候模型:

$$Y = -254.82 + 0.186T + 0.385S + 0.578R_{8-9} + 0.1602R_{2-4}$$

式中, $Y$  为冬小麦气候产量; $T$  为 5 月最高气温平均; $S$  为 6 月上旬—中旬日照时数; $R_{8-9}$  为冬小麦播种前后 8—9 月降水量; $R_{2-4}$  为冬小麦返青前后 2—4 月降水量。

复相关系数为  $R=0.856(F=17.131, P<0.01)$ 。

## 3 结论

(1) 研究区域降水量年际变化呈波动变化,20 世纪 90 年代降水量最少,距平百分率  $-13.0\%$ ,21 世纪 10 年代降水量接近平均值。降水量存在  $3\text{ a}$ 、 $8\text{ a}$  的年际周期变化, $3\text{ a}$ 、 $8\text{ a}$  周期振荡分别在 1960—1970、1975—1985 年为中心的局部时段内周期振荡最强,其余时段周期振荡较弱。气温年际变化呈显著上升趋势,气温变化曲线线性拟合倾向为  $0.325^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。1970 年之后持续上升。作物生长季干燥指数变化呈显著上升趋势,干燥指数变化曲线线性拟合倾向率为  $0.069/10\text{ a}$ ,1963—1971 年为相对湿润期,20 世纪 70 年代至 80 年代干湿交替,90 年代初至 2010 年趋于暖干化,干燥指数明显上升。

(2) 冬小麦生长发育受气候变暖,气温增高的影响,使冬小麦播种期每  $10\text{ a}$  推后  $2\text{—}3\text{ d}$ ;返青期每  $10\text{ a}$  提前  $4\text{—}5\text{ d}$ ,开花期和成熟期每  $10\text{ a}$  提前  $5\text{—}6\text{ d}$ 。冬小麦越冬期每  $10\text{ a}$  缩短  $5\text{—}6\text{ d}$ 、全生育期每  $10\text{ a}$  缩短  $7\text{—}8$

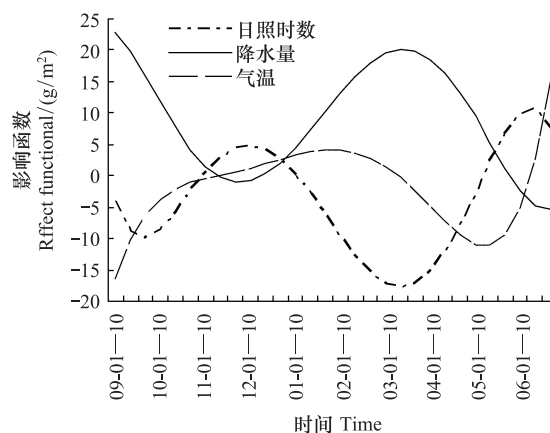


图 5 冬小麦产量与旬气象要素积分回归曲线

Fig.5 Curve of integral regression between winter wheat yields and ten-day period average meteorological factor

d. 其生物学机理是气温增高使冬小麦停止生长期缩短, 营养生长阶段加快, 全生育期缩短。冬小麦穗的干物质积累分析表明, 冬小麦返青后 83 天开始, 穗的生长由缓慢转为迅速生长阶段, 在返青后的第 87 天, 穗的生长速度最大可达  $18.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 从返青后第 101 天开始, 其生长从迅速生长又转为缓慢生长。穗的干物质迅速积累期为 18d。

(3) 由于气候变暖, 冬小麦生育期大部分时段热量充足; 播种—越冬前和拔节—开花期产量对气温变化的响应十分敏感, 旬平均气温每升高  $1^{\circ}\text{C}$ , 冬小麦产量降低  $10\text{--}15 \text{ g/m}^2$ , 敏感期分别为 20—25 d、30—40 d。降水量的影响函数同热量的影响函数呈反相位分布, 除成熟期降水量对冬小麦产量形成负效应外, 其余时段降水量对冬小麦产量形成均为正效应, 而在冬小麦播种期和返青—拔节期产量对降水变化的响应也十分敏感, 旬降水量每增加 1 mm, 冬小麦产量可增加  $15\text{--}20 \text{ g/m}^2$ , 敏感期分别为 20—25 d、50—60 d。冬前到初冬光照充足有利于冬前抗寒锻炼, 光照对冬小麦灌浆期产量形成具有显著的正效应; 旬日照时数每增加 1 h, 冬小麦产量增加  $5\text{--}10 \text{ g/m}^2$ , 敏感期为 25—35 d; 光照充足有利于干物质形成积累。

(4) 统计分析表明秋季气温偏高对产量不利, 表明当地播期仍偏早, 不但造成冬前旺长, 越冬易受冻害, 而且过多消耗土壤水分。气温偏高年份适当推迟播种有利于增产。气温正效应最大是在隆冬到后冬, 表明本地区冬冷可加重冻害推迟返青, 暖冬有利于安全越冬, 提早返青, 延长穗分化期。播种期降水量过多会影响作业, 延迟播期和影响出苗, 统计结果此期间降水为正效应, 表明降水过多造成不利的情况在本地区极少出现, 绝大多数情况属降水不足。光照对产量影响效应曲线与降水曲线完全反相位。光照呈正效应的只在冬前到初冬和灌浆期两段, 其它时段均为负效应, 表明本地区缺水是主要矛盾, 特别是幼苗期降水有利苗全苗壮, 隆冬到后冬多雪有利安全越冬, 返青到抽穗降水多有利增加穗数和粒数。初冬是小麦抗寒锻炼的第二阶段, 仍需适当的光照。

## References:

- [1] IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Lobell D B, Asner G P. Climate and management contributions to recent trends in US agricultural yield. *Science*, 2003, 299(5609): 1032-1032.
- [4] Peng S B, Huang J L, Sheehy J E, Laza R C, Visperas R M, Zhong X H, Centeno G S, Khush G S, Cassman K G. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 2004, 101(27): 9971-9975.
- [5] Chmielewski F M, Müller A, Bruns E. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961—2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121(1/2): 69-78.
- [6] Lin E D. Simulation on Influence of Global Climate Change on Agriculture in China. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 1997: 1-20.
- [7] Qin D H. Facts, impact, adaptation and mitigation strategy of climate change. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2003, 17(1): 1-3.
- [8] Zhang J P, Zhao Y X, Wang C Y, He Y, He Y. Effects of climate change on winter wheat growth and yield in North China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7): 1179-1184.
- [9] Wang F T. Impacts of climate change on cropping system and its implication for agriculture in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 11(4): 407-415.
- [10] Li J, Gao P, Chen Y C, Chen H, Yang T M, Huang J F, Jin Z F, Peng D L. Relationships between farming system and effective accumulated temperature in East China. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(3): 361-368.
- [11] Ren G Y, Xu Y. Observed and projected climate changes. *Science and Technology Review*, 2004, (7): 10-16.
- [12] Xu M Z, Ren G Y. Change in growing season over china; 1961—2000. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004, 15(3): 306-312.
- [13] Pu J Y, Yao Y B, Ma P L, Deng Z Y, Wang W T, Zhang M C. Responses of winter wheat growth to winter warming in Gansu Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6): 1237-1241.
- [14] Wan X, Wang R Y. Study on the influence of climate change to winter wheat ecological characteristic in the east of Gansu. *Agricultural Research in*

the Arid Areas, 2007, 25(4): 80-84.

- [15] Yao Y B, Deng Z Y, Wang R Y, Wang Y R, Pu J Y, Zang X Y. The influence of climate changes on potato growth in Gansu province. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(3): 16-20.
- [16] Yao Y B, Wang R Y, Deng Z Y, Han S L, Xing T Q. Effects of climate change on potato growth in semi-arid region of Loess Plateau, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 379-385.
- [17] Yao Y B, Wang Y R, Li Y H, Zhang X Y. Climate warming and drying and its environmental effects in the loess plateau. *Resources Science*, 2005, 27(5): 146-152.
- [18] Zhang Q, Deng Z Y, Zhao Y D, Qiao J. The impacts of global climatic change on the agriculture in northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1210-1218.
- [19] Deng Z Y, Zhang Q, Pu J Y, Liu D X, Guo H, Wang Q F, Zhao H, Wang H L. The impact of climate warming on crop planting and production in northwestern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3760-3768.
- [20] Wang R Y, Zhang Q, Wang Y L. Response of corn to climate warming in arid areas in Northwest China. *Chinese Bulletin of Botany*, 2004, 46(12): 1387-1392.
- [21] Liu D X, Dong A X, Deng Z Y. Impact of climate warming on agriculture in Northwest China. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(1): 119-125.
- [22] Pu J Y, Yao X Y, Deng Z Y, Yao Y B, Wang W T, Zhang M C. Impact of climate warming on winter rape planting in gansu province. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(9): 1397-1401
- [23] China Meteorological Administration. *The Observation Criterion of Agro-Meteorology*. Beijing: Meteorological Press, 1993: 27-31.
- [24] Wei F Y. *Statistic Diagnose and Foreshadow Technology in Present Climate*. Beijing: Meteorological Press, 2007: 175-181.
- [25] Wu H B, Wu L. *Methods for Diagnosing and Forecasting Climate Variability*. Beijing: Meteorological Press, 2005: 208-244.
- [26] Deng Z Y, Qiu H M, Li H D. *Development of Climate and Agriculture in the East of Gansu*. Beijing: China Meteorology Press, 2000: 32-34.

#### 参考文献:

- [6] 林而达. 全球气候变化对中国农业影响的模拟. 北京: 中国农业科技出版社, 1997: 1-20.
- [7] 秦大河. 气候变化的事实与影响及对策. 中国科学基金, 2003, 17(1): 1-3.
- [8] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 何勇. 气候变化对我国华北地区冬小麦发育和产量的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(7): 1179-1184.
- [9] 王馥棠. 气候变化对种植制度的影响及其对我国农业的启示. *气象学报*, 1997, 11(4): 407-415.
- [10] 李军, 高苹, 陈艳春, 陈惠, 杨天明, 黄敬峰, 金志凤, 彭代亮. 华东地区耕作制度对积温变化的响应. *生态学杂志*, 2008, 27(3): 361-368.
- [11] 任国玉, 徐影. 气候变化的观测事实与未来趋势. *科技导报*, 2004, (7): 10-16.
- [12] 徐铭志, 任国玉. 近40年中国气候生长期的变化. *应用气象学报*, 2004, 15(3): 306-312.
- [13] 蒲金涌, 姚玉璧, 马鹏里, 邓振镛, 王位泰, 张谋草. 甘肃省冬小麦生长发育对暖冬现象的响应. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1237-1241.
- [14] 万信, 王润元. 气候变化对陇东冬小麦生态影响特征研究. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(4): 80-84.
- [15] 姚玉璧, 邓振镛, 王润元, 王毅荣, 蒲金涌, 张秀云. 气候暖干化对甘肃马铃薯生产的影响. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(3): 16-20.
- [16] 姚玉璧, 王润元, 邓振镛, 韩树林, 邢托勤. 黄土高原半干旱区气候变化及其对马铃薯生长发育的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 379-385.
- [17] 姚玉璧, 王毅荣, 李耀辉, 张秀云. 中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响. *资源科学*, 2005, 27(5): 146-152.
- [18] 张强, 邓振镛, 赵映东, 乔娟. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响. *生态学报*, 2008, 28(3): 1210-1218.
- [19] 邓振镛, 张强, 蒲金涌, 刘德祥, 郭慧, 王全福, 赵鸿, 王鹤龄. 气候变暖对中国西北地区农作物种植的影响. *生态学报*, 2008, 28(8): 3760-3768.
- [20] 王润元, 张强, 王耀林, 杨兴国, 韩永翔, 杨启国. 西北干旱区玉米对气候变暖的响应. *植物学报*, 2004, 46(12): 1387-1392.
- [21] 刘德祥, 董安祥, 邓振镛. 中国西北地区气候变暖对农业的影响. *自然资源学报*, 2005, 20(1): 119-125.
- [22] 蒲金涌, 姚小英, 邓振镛, 姚玉璧, 王位泰, 张谋草. 气候变暖对甘肃冬油菜 (*Brassica campestris* L.) 种植的影响. *作物学报*, 2006, 32(9): 1397-1401.
- [23] 国家气象局. *农业气象观测规范*. 北京: 气象出版社, 1993: 27-31.
- [24] 魏凤英. *现代气候统计诊断与预测技术*. 北京: 气象出版社, 2007: 175-181.
- [25] 吴洪宝, 吴蕾. *气候变率诊断和预测方法*. 北京: 气象出版社, 2005: 208-244.
- [26] 邓振镛, 仇化民, 李怀德. *陇东气候与农业开发*. 北京: 气象出版社 2000: 32-34.

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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 16 期 (2012 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 32 No. 16 (August, 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 1000717, 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:1000717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 1000717, 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