

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第10期 Vol.34 No.10 **2014**

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 34 卷 第 10 期 2014 年 5 月 (半月刊)

## 目次

### 前沿理论与学科综述

- 景观可持续性与景观可持续性科学..... 赵文武,房学宁 (2453)
- 生态系统服务付费的诊断框架及案例剖析 ..... 朱文博,王 阳,李双成 (2460)
- 湿地植物根表铁膜研究进展..... 刘春英,陈春丽,弓晓峰,等 (2470)
- 水生生态环境中捕食信息素的生态学效应..... 覃光球,卢豪良,唐振柱,等 (2481)
- 脊椎动物传播植物肉质果中的次生物质及其生态作用 ..... 潘 扬,罗 芳,鲁长虎 (2490)

### 个体与基础生态

- 中亚热带天然林土壤  $\text{CH}_4$  吸收速率对模拟 N 沉降的响应 ..... 陈朝琪,杨智杰,刘小飞,等 (2498)
- 塔里木盆地南缘早生芦苇生态特征与水盐因子关系..... 贡 璐,朱美玲,塔西甫拉提·特依拜,等 (2509)
- 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (2519)
- 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应..... 余再鹏,万晓华,胡振宏,等 (2529)
- 施钾提高蚜害诱导的小麦茉莉酸含量和叶片相关防御酶活性..... 王 伟,张月玲,苏建伟,等 (2539)
- 高浓度  $\text{O}_3$  及太阳辐射减弱对冬小麦 PS II 光合活性及光能耗散的影响 ..... 孙 健,郑有飞,吴荣军,等 (2548)
- 蜡样芽孢杆菌 B3-7 在大田小麦根部的定殖动态及其对小麦纹枯病的防治效果 ..... 黄秋斌,张 颖,刘凤英,等 (2559)
- 有限供水下冬小麦全程耗水特征定量研究..... 张兴娟,薛绪掌,郭文忠,等 (2567)
- 抗真菌转基因水稻生态适合度评价..... 李 伟,郭建夫,袁红旭,等 (2581)
- 花生叶片蛋白组对 UV-B 辐射增强的响应 ..... 杜照奎,李钧敏,钟章成,等 (2589)
- 南海南部悬浮颗粒物脂肪酸组成..... 刘华雪,柯常亮,李纯厚,等 (2599)
- 年龄、集群、生境及天气对鄱阳湖白鹤越冬期日间行为模式的影响..... 袁芳凯,李言阔,李凤山,等 (2608)
- [树]麻雀羽再生的能量预算和水代谢散热调节 ..... 杨志宏,吴庆明,杨 渺,等 (2617)
- 低剂量杀虫剂对星豹蛛捕食效应的影响及其机理 ..... 李 锐,李 娜,刘 佳,等 (2629)
- 空心莲子草叶甲对越冬保护的响应与控害效能..... 刘雨芳,王秀秀,李 菲,等 (2638)

### 种群、群落和生态系统

- 气候变化对鄱阳湖白鹤越冬种群数量变化的影响..... 李言阔,钱法文,单继红,等 (2645)
- 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化..... 刘文静,张平究,董国政,等 (2654)

查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析 .....	李然然,章光新,张 蕾 (2663)
闽江河口区淡水和半咸水潮汐沼泽湿地土壤产甲烷菌多样性.....	曾志华,杨民和,余晨兴,等 (2674)
环境及遗传背景对延河流域植物叶片和细根功能性状变异的影响.....	郑 颖,温仲明,宋 光,等 (2682)
衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变.....	杨 宁,邹冬生,杨满元,等 (2693)
海平面上升影响下广西钦州湾红树林脆弱性评价.....	李莎莎,孟宪伟,葛振鸣,等 (2702)
中国南方3种主要人工林生物量和生产力的动态变化.....	杜 虎,曾馥平,王克林,等 (2712)
杉木人工林土壤真菌遗传多样性.....	何苑擘,周国英,王圣洁,等 (2725)
科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应.....	张腊梅,刘新平,赵学勇,等 (2737)
黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律.....	申家朋,张文辉 (2746)
<b>景观、区域和全球生态</b>	
南亚热带森林演替过程中小气候的改变及对气候变化的响应.....	刘效东,周国逸,陈修治,等 (2755)
黄淮海平原典型站点冬小麦生育阶段的干旱特征及气候趋势的影响.....	徐建文,居 辉,刘 勤,等 (2765)
<b>资源与产业生态</b>	
基于GIS的山西省矿产资源规划环境影响评价 .....	刘 伟,杜培军,李永峰 (2775)
基于效益分摊的水电水足迹计算方法——以密云水库为例 .....	赵丹丹,刘俊国,赵 旭 (2787)
<b>学术信息与动态</b>	
全球土地计划第二次开放科学大会(GLP 2 <sup>nd</sup> Open Science Meeting)会议述评 .....	段宝玲,卜玉山 (2796)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 348 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 36 * 2014-05	



**封面图说:** 鄱阳湖越冬的白鹤群——白鹤为国家一级保护动物,世界上白鹤东部种群的迁徙路线是从俄罗斯西伯利亚的雅库特,向南迁飞 5100km 到中国长江下游的鄱阳湖越冬,其中途经俄罗斯的雅纳河、印迪吉尔卡河和科雷马河流域,进入中国后主要停歇地有扎龙、林甸、莫莫格以及双台河口、滦河口、黄河三角洲和升金湖等地。多年的监测表明,世界 90% 以上的白鹤种群都在鄱阳湖越冬。越冬初期和末期是白鹤补充能量的关键阶段,因此,研究鄱阳湖国家级自然保护区越冬白鹤种群数量和当地气候变化的相关性具有重要意义。

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

DOI: 10.5846/stxb201306041314

徐建文, 居辉, 刘勤, 李迎春. 黄淮海平原典型站点冬小麦生育阶段的干旱特征及气候趋势的影响. 生态学报, 2014, 34(10): 2765-2774.

Xu J W, Ju H, Liu Q, Li Y C. Drought variations of winter wheat in different growth stages and effects of climate trend in Huang-Huai-Hai Plain, China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2765-2774.

## 黄淮海平原典型站点冬小麦生育阶段的 干旱特征及气候趋势的影响

徐建文<sup>1,2</sup>, 居 辉<sup>1,3,\*</sup>, 刘 勤<sup>1,4</sup>, 李迎春<sup>1,3</sup>

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所作物高效用水与抗灾减损国家工程实验室, 北京 100081;

2. 大连市气象局, 大连 116001; 3. 农业部农业环境重点实验室, 北京 100081;

4. 农业部旱作节水农业重点实验室, 北京 100081)

**摘要:**以黄淮海平原为研究区域, 选择了区域内具有代表性的 5 个站点, 使用相对湿度指数, 从气象干旱的角度分析了近 30 年冬小麦各主要生育阶段干旱的时空变化特征, 以及干旱特征的气候趋势影响, 结果表明: (1) 黄淮海平原冬小麦除苗期外其他生育阶段干旱由北向南逐渐减轻, 在冬小麦播种—出苗期南部有干旱化的趋势, 而北部有干旱减弱的趋势, 全生育期也有相同的微弱趋势; 在出苗—拔节期干旱最为严重, 呈现北部微弱干旱化而南部湿润化的趋势, 抽穗—成熟期呈干旱化的趋势, 且从北向南干旱变化幅度递增。 (2) 在冬小麦全生育期, 天津与石家庄主要以中旱和重旱为主, 而莘县轻旱、中旱和重旱的频率相当, 徐州与驻马店则以轻旱为主。天津、石家庄的干旱持续较为严重, 而驻马店近 30 年无干旱的持续。 (3) 在拔节—抽穗期和抽穗—成熟期, 徐州、驻马店的干旱程度随着温度的降低有减弱趋势。播种—出苗期, 天津与徐州随着太阳辐射量的增加将呈干旱化的趋势; 另外, 石家庄与驻马店在冬小麦各生育阶段将会随着相对湿度的减小而有干旱化的趋势; 黄淮海南部地区在冬小麦全生育期和抽穗—成熟期将会随着风速的减小而呈湿润化的趋势。研究结果可从关键生育期的角度为黄淮海平原干旱对冬小麦产量影响的模拟研究以及小麦生产的抗旱对策提供理论依据。

**关键词:** 干旱; 生育阶段; 相对湿度; 冬小麦; 黄淮海平原

## Drought variations of winter wheat in different growth stages and effects of climate trend in Huang-Huai-Hai Plain, China

XU Jianwen<sup>1,2</sup>, JU Hui<sup>1,3,\*</sup>, LIU Qin<sup>1,4</sup>, LI Yingchun<sup>1,4</sup>

1 State Key Engineering Laboratory of Crops Efficient Water Use and Drought Mitigation, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Science Beijing 100081, China

2 Dalian Meteorological Bureau, Dalian 116001, China

3 Key Laboratory of Agricultural Environment, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

4 Key Laboratory of Dryland Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

**Abstract:** With the purpose of probing the drought characteristic in growth stages and its possible climate factors of winter wheat in Huang-Huai-Hai plain (3H plain) under climate change, based on meteorology data of 5 selected meteorological stations from 1981 to 2010, relative moist index has been calculated to investigate the temporal variability of drought characteristic in five growth stages of winter wheat in 3H Plain in recent 30 years. The results indicated that on the temporal variation, an increasing drought trend was detected in sowing to seeding stage in southern of 3H plain while a contrary trend

**基金项目:** 国家 973 项目 (2012CB955904); 国家“十二五”科技支撑计划项目 (2012BAD09B01, 2013BAD11B03); 2014 基本科研业务费项目 (BSRF201305)

**收稿日期:** 2013-06-04; **修订日期:** 2014-04-18

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: juhui@ieda.org.cn

was found in northern of 3H plain, and the same slight tendency was detected in whole growth period. The drought of growth stages except seedling stage was reduced from north to south. The most severe drought occurred in the seeding to jointing stage and a slight increasing drought trend was detected in north while a decreasing drought trend in south in this stage. A drought trend was detected in heading to maturity, with higher magnitude in south than in north. Tianjin and Shijiazhuang stations were observed to be medium drought and serious drought primarily in whole growth period, the frequency of varying degrees of droughts in Shenxian station was equivalent while Xuzhou and Zhumadian stations were observed to be primarily slight drought from 1981 to 2009. Continuous drought of Tianjin and Shijiazhuang station was serious while sustained drought was not found in Zhumadian station in recent 30 years. With the temperature increasing, aridification might be enhanced in Tianjin and Shijiazhuang stations while a contrary trend was found in Shenxian, Xuzhou and Zhumadian stations in whole growth period of winter wheat. The trend of drought will be alleviated with the temperature decreasing in jointing to heading stage and heading to maturity stage. Drought in sowing to seeding stage will be more obvious in Tianjin and Xuzhou stations with the solar radiation increasing. There was a drought trend detected in Shijiazhuang and Zhumadian stations with the relative humidity decreasing in growth stages. Besides, with the wind speed decreasing, moisture tendency will be found in whole growth period and heading to maturity in southern of 3H Plain. The research results can provide a reference for the simulation study on the impact of drought on yield of winter wheat and developing appropriate measures to reduce droughts in the 3H plain.

**Key Words:** drought; growth stages; relative moist index; winter wheat; 3H plain

干旱是目前全球最严重的灾害之一,已成为危及人类生存环境的严重问题,也是科学界普遍关心的科学问题<sup>[1]</sup>,据 Obasi<sup>[2]</sup>统计,在各类自然灾害造成的总损失中,气象灾害引起的损失约占 85%,而干旱又占气象灾害损失的 50%左右。由于气候变暖所引起的降水减少和蒸发的增加将导致干旱的强度和频率增加<sup>[3-5]</sup>,近 50 年来受全球气候变化的影响,我国降水量呈现南方偏多北方偏少的变化趋势,使得北方主要农业区不同程度的干旱面积均有扩大趋势<sup>[6-7]</sup>,主要表现为半干旱区干旱化的趋势及范围增大<sup>[8-10]</sup>,由于干旱造成的受灾面积及经济损失有逐步增加的趋势,灾害发生的频率也在不断加快<sup>[11]</sup>。据统计,我国平均每年旱灾的受灾面积高达 2200 万  $\text{hm}^2$ ,占各种灾害受灾面积的 40%以上,粮食损失约 120 亿  $\text{kg}$ <sup>[12]</sup>。有学者研究指出,未来 40a 中国气候总体上呈暖干,半干旱地区的扩大趋势依然很明显,黄淮海平原将经历最干旱的时段,极端干旱的干旱频率及干旱历时将达最大<sup>[13-14]</sup>,干旱仍旧是我国未来几十年将要长期面临的气象灾害。

小麦是我国仅次于水稻的第二大作物,其播种面积占全国耕地面积的 20%—30%,占粮食产量的 20%—25%<sup>[15]</sup>,黄淮海平原是我国最大的冬麦区,冬小麦生长季正值该地区降水稀少的时期,降水量大

多不足 250 mm,越往北降水越少,至京津一带已不足 150 mm。但冬小麦全生育期和关键期的需水量分别为 350—500 mm 和 200—250 mm 左右,缺水量达 300 mm 左右,降水最多的年份也不能满足冬小麦正常 400—550 mm 的需水量。在冬小麦拔节、抽穗、灌浆的需水关键期(4—5 月),同期降水量仅占需水量的 1/5—1/4,水分亏缺量达 200 mm 左右<sup>[16-17]</sup>。然而,现有的黄淮海平原干旱对冬小麦的影响识别的研究大多为田间试验<sup>[18-19]</sup>,对于区域的研究比较少且很多研究主要集中在气象干旱对产量影响的表观层面<sup>[20-21]</sup>,细化到具体生育进程干旱特征的研究不多。因此,本文以温度、降水等气象数据为基础,使用相对湿度指数研究了黄淮海平原冬小麦不同生育阶段的干旱的变化特征,并且分析干旱特征与主要气候要素的相关性,探究该地区冬小麦生育阶段干旱的气候发展趋势,以期在气候变化的背景下,从关键生育期的角度为黄淮海平原干旱对冬小麦产量影响模拟的研究以及小麦生产抗旱提供理论依据。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料选取

本文参考刘巽浩等<sup>[22]</sup>编制的中国农作制分区,



选用了黄淮海平原主要农业区具有 1981—2009 年完整生育期资料的 5 个典型气象站点作为分析对象,站点分布如图 1 所示,其中,天津为环渤海山东半岛滨海外向型二熟农渔区典型站点,石家庄为燕山太行山山前平原水浇地二熟区典型站点,莘县为海河低平原缺水水浇地二熟兼旱地一熟区典型站点,徐州与驻马店为黄淮平原南阳盆地旱地水浇地

二熟区典型站点。1) 各站点近 30a 逐日降水量 (mm)、平均气温 (°C)、最低气温 (°C)、最高气温 (°C)、日照时数 (h)、风速 (m/s) 和平均相对湿度 (%) 等气象数据,由中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/>) 提供。2) 各站点 1981—2009 年逐年的冬小麦生育期资料来源于国家气象信息中心。

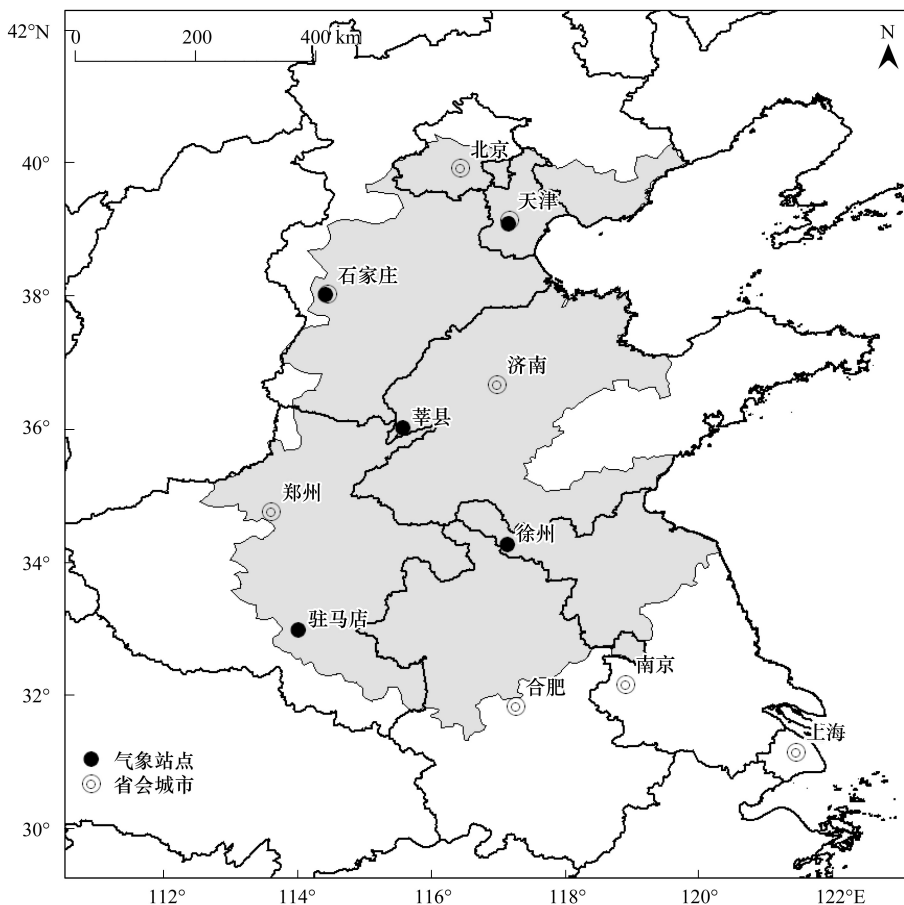


图 1 黄淮海平原气象站点分布图

Fig.1 The location of meteorological stations in Huang-Huai-Hai (3H) plain

## 1.2 研究方法

干旱指标选用《气象干旱等级》标准中所提供的相对湿度指数(划分等级见表 1),其计算公式如下:

$$M = \frac{P - PE}{PE} \quad (1)$$

式中, $P$  为某时段降水量 (mm),  $PE$  为某时段的可能蒸散量 (mm), 本文采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith<sup>[23]</sup> 方法计算, 计算公式如下:

$$PE = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

式中, $R_n$  为作物表面净辐射量 ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $G$  为土壤热通量 ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $\Delta$  为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率 ( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}$ );  $\gamma$  为湿度计常数 ( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ );  $T$  为空气平均温度 ( $^\circ\text{C}$ );  $U_2$  为在地面以上 2m 高处的风速 ( $\text{m/s}$ );  $e_s$  为空气饱和水汽压 ( $\text{kPa}$ );  $e_a$  为空气实际水汽压 ( $\text{kPa}$ )。

干旱对冬小麦生长发育及产量影响较大的时期是播种期、拔节到孕穗期以及灌浆期<sup>[24-25]</sup>。因此,为了更好的识别各主要生育阶段的干旱特征,本文将冬小的生育期分为全生育期、播种—出苗期、出苗—拔节期、拔节—抽穗期与抽穗—成熟期这 5 个生育

阶段进行分析。

表 1 相对湿度气象干旱等级划分表  
Table 1 The Meteorological drought classification of relative moist index

等级 Level	类型 Type	相对湿度 Relative moist index
1	无旱	$-0.40 < M$
2	轻旱	$-0.65 < M \leq -0.40$
3	中旱	$-0.80 < M \leq -0.65$
4	重旱	$-0.95 < M \leq -0.80$
5	特旱	$M \leq -0.95$

来源:气象干旱等级(GB/T 20481—2006)

2 结果分析

2.1 冬小麦生育阶段的干旱特征

2.1.1 相对湿润度的变化特征

黄淮海平原近 30 年来冬小麦主要生育阶段的相对湿度变化特征如表 2 所示,除苗期外,各生育阶段的相对湿度从天津到驻马店,呈现由北向南逐渐增大的趋势,即由北向南干旱逐渐减轻,且驻马店在冬小麦的各生育阶段相对湿度均大于-0.4,

表现为无旱的特征,这主要是由于黄淮海平原降水量与太阳辐射量等气候要素的纬向分布导致的。在冬小麦全生育期,相对湿润度的年际变化趋势不大,天津与石家庄为 0.01/10a,而莘县、徐州与驻马店为-0.01/10a,从相对湿润度的区域分布来看,在冬小麦全生育期黄淮海平原南部有干旱化的趋势,而北部有干旱减弱的趋势,但是趋势不显著。而在苗期,相对湿润度的年际变化趋势明显,且区域分布与全生育期一样存在南北差异,其中,天津的变化趋势为 0.79/10a,而徐州与驻马店的的变化趋势达-0.83/10a和-1.28/10a,且都通过了  $\alpha < 0.05$  的显著性检验。在出苗—拔节期,由于黄淮海平原冬季降水较少,所以这一时期干旱最为严重,其中天津表现为重旱的特征,但是相对湿润度的年际变化趋势不明显,且区域分布与全生育期不同,呈现北部微弱干旱化而南部湿润化的趋势。拔节—抽穗期的干旱程度也比较严重,且相对湿润度的变化率除天津外均有增加的趋势,表现为干旱减弱的趋势。在抽穗—成熟期,相对湿润度的年际变化均在减小,即有干旱化的趋势,且从北向南有干旱变化幅度递增的趋势。

表 2 黄淮海平原近 30 年冬小麦生育阶段相对湿润度的变化特征

Table 2 The variability of relative moist index in growth stages of winter wheat in 3H plain

站点 Stations	全生育期 Whole growth period		播种—出苗期 Sowing to seeding stage		出苗—拔节期 Seedling to jointing stage		拔节—抽穗期 Jointing to heading stage		抽穗—成熟期 Heading to maturity stage	
	均值 Mean	变化率 Slope (/10a)	均值 Mean	变化率 Slope (/10a)	均值 Mean	变化率 Slope (/10a)	均值 Mean	变化率 Slope (/10a)	均值 Mean	变化率 Slope (/10a)
天津	-0.77	0.01	-0.15	0.79	-0.84	-0.01	-0.74	-0.05	-0.72	-0.01
石家庄	-0.75	0.01	-0.61	0.19	-0.77	-0.00	-0.81	0.03	-0.67	-0.00
莘县	-0.72	-0.01	-0.43	-0.34	-0.77	-0.01	-0.79	0.08	-0.61	-0.02
徐州	-0.50	-0.01	-0.14	-0.83 *	-0.44	0.05	-0.65	0.02	-0.47	-0.04
驻马店	-0.32	-0.01	0.31	-1.28 *	-0.29	0.02	-0.37	0.13	-0.33	-0.04

2.1.2 干旱频率

从黄淮海平原冬小麦生育阶段不同程度干旱频率的区域分布(图 2)可以看出,在播种—出苗期,特旱的发生频率要高于其他程度的干旱,其中石家庄与徐州特旱的频率超过了 50%;在出苗—拔节期,天津、石家庄与莘县主要以中旱和重旱为主,其中石家庄中旱的频率超过了 50%,而徐州与驻马店主要以轻旱为主;在拔节—抽穗期,干旱较出苗—拔节期有所加重,不同程度的干旱均有发生,但天津、石家庄

与莘县重旱与特旱的频率较高;抽穗—成熟期,特旱发生的频率明显降低,但是除驻马店外,各站点重旱的频率都在 30%左右;总得来看,天津与石家庄在冬小麦全生育期主要以中旱和重旱为主,频率大约在 40%左右,而莘县在冬小麦全生育期轻旱,中旱和重旱的频率相当,在 30%—40%之间,徐州与驻马店则以轻旱为主,频率大约为 40%—50%。从干旱频率的区域分布也可以看出,黄淮海平原干旱发生的程度与频率存在着南北差异,表现为北部干旱强于南部。

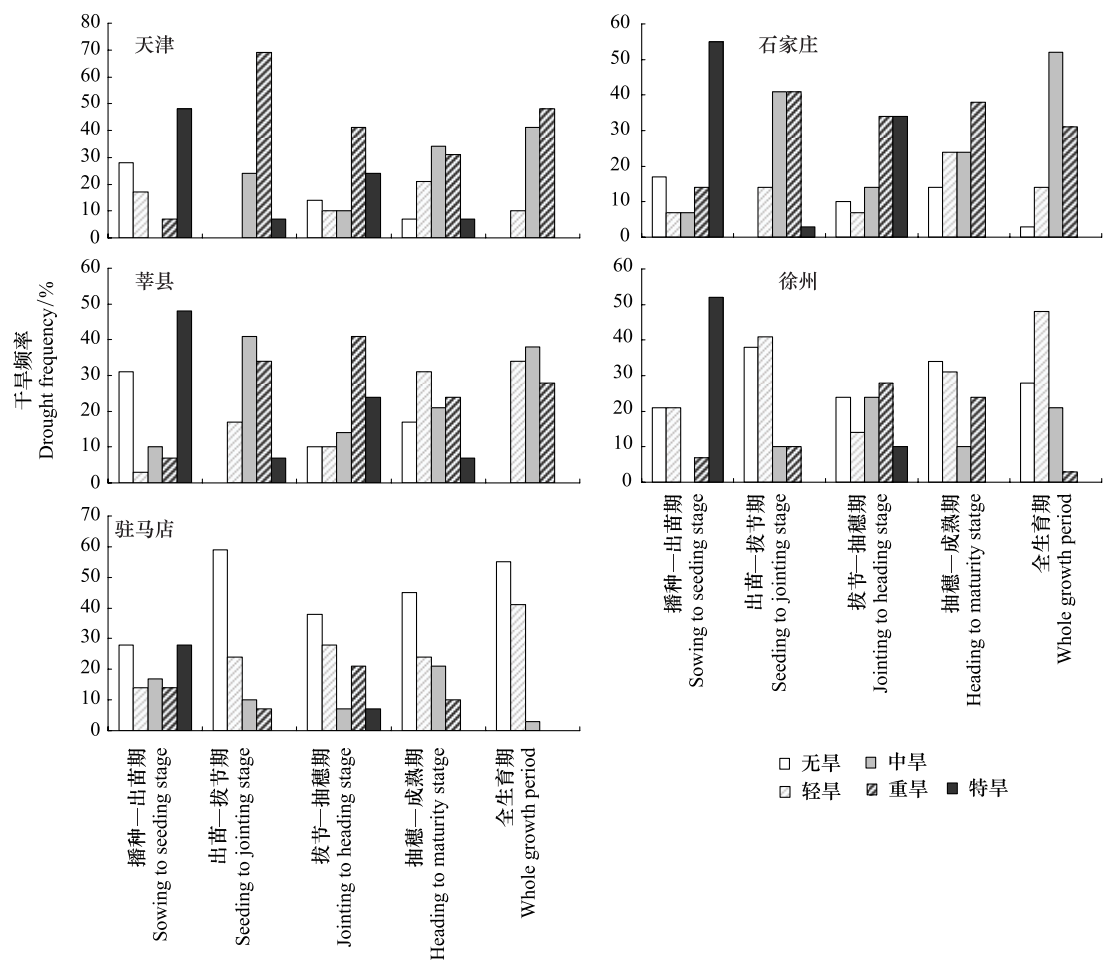


图2 黄淮海平原近30年冬小麦生育阶段不同程度干旱频率

Fig.2 The variability of different drought frequency in five growth stages of winter wheat in 3H Plain

另外,近30年黄淮海平原冬小麦的各生育阶段,不仅中等干旱程度以上频率较高,而且在时间上也有持续性。由表3中可以看出,在全生育期,天津、石家庄与莘县均有持续5a以上的干旱发生,其中石家庄在1981—1989连续9a发生中旱;在播种—出苗期,天津、石家庄及徐州都出现了连续的特旱,其中徐州在1989—1993和2003—2008发生了两次特旱的持续;在出苗—拔节及拔节—抽穗期,天津、石家庄和莘县都有持续干旱发生,尤其是天津在出苗—拔节期,从1995—2008连续14a重旱,石家

表3 黄淮海平原近30年冬小麦生育阶段中等程度以上干旱持续时间5a以上的分布状况

Table 3 The distribution of the continuous drought in growth stages of winter wheat in 3H plain

	天津	石家庄	莘县	徐州	驻马店
全生育期 Whole growth period	中旱:2004—2008	中旱:1981—1989 中旱:1992—1997	中旱:2004—2008		
播种—出苗期 Sowing to seedling stage	特旱:1991—1995	特旱:2005—2009		特旱:1989—1993 特旱:2003—2008	
出苗—拔节期 Seeding to jointing stage	重旱:1995—2008	中旱:1981—1989 中旱:1992—1996	中旱:1981—1989 中旱:2000—2005		
拔节—抽穗期 Jointing to heading stage	中旱:1985—1989 中旱:1999—2003	重旱:1981—1986	中旱:1995—2000		
抽穗—成熟期 Heading to maturity stage		重旱:1993—1997			



庄也在 1981—1986 持续发生了 6a 重旱;在抽穗—成熟期,只有石家庄在 1993—1997 连续 5a 为重旱。从区域分布来看,天津、石家庄的干旱持续较为严重,而驻马店近 30 年没有干旱的持续。

### 2.2 冬小麦生育期内气候因素的年际变化趋势

对黄淮海平原冬小麦主要生育阶段的气候要素的变化率进行分析(表 4),从表中可以看出,在冬小麦全生育期,各站点的平均温度均有增加的趋势,变化范围在 0.02—0.06℃之间,且除天津外,均通过  $\alpha < 0.05$  的显著性检验,这与近些年来气候变暖的事实相符<sup>[26]</sup>,出苗—拔节期的温度变化情况与全生育期相似;在拔节—抽穗期,各站点的温度均有降低的趋势,且温度降低的趋势在抽穗—成熟期更为明显,变化范围在 -0.02—0.06℃之间,除石家庄与莘县外均通过  $\alpha < 0.01$  的显著性检验;总的来说,在冬小麦生育前期,温度有上升的趋势,生育后期有下降的趋势,整个生育期温度呈显著升高的趋势。太阳辐射的变化与温度的变化趋势正好相反,在冬小麦全生育期与出苗—拔节期,太阳辐射量为减少的趋势,变化范围在 -16.2—-6.34 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> 之间,通过了  $\alpha <$

0.01 的显著性检验,而在抽穗—成熟期,太阳辐射量为增加的趋势。另外,从各站点全生育期均值可以看出,太阳辐射量存在由北向南逐渐递减的纬向分布特征。相对湿度的年际变化趋势并不明显,从表中可以看出,石家庄与驻马店在冬小麦的 5 个生育阶段相对湿度均有降低的趋势,且 5 个站点的相对湿度在生育期后期有减小的趋势。对风速的变化趋势分析表明,黄淮海平原近年来在冬小麦生育阶段的风速有降低的趋势,除天津外,其余站点在冬小麦的各生育阶段的风速降低趋势通过了  $\alpha < 0.05$  的显著性检验,且风速的变化在冬小麦生育前期呈现由南向北减幅递增的趋势。降水量的分布从北向南有明显的增加,冬小麦全生育期驻马店的降水量是天津的 1 倍多;莘县、徐州及驻马店除拔节—抽穗期降水有增加的趋势外,其他生育阶段降水均有减少的趋势,而天津与石家庄除出苗—拔节期外,变化趋势与莘县、徐州及驻马店相反,降水量有增加的趋势,这些趋势并不显著;因此,在黄淮海平原降水量的年际变化趋势存在一定的南北差异。

表 4 黄淮海平原近 30 年冬小麦生育阶段气候要素的年际变化趋势

Table 4 The annual variation of climate factor in five growth stages of winter wheat in 3H plain

站点 Station	全生育期 Whole growth period		播种—出苗期 Sowing to Seeding stage		出苗—拔节期 Seeding to jointing stage		拔节—抽穗期 Jointing to heading stage		抽穗—成熟期 Heading to maturity stage	
	均值 Mean	变化率 Slope	均值 Mean	变化率 Slope	均值 Mean	变化率 Slope	均值 Mean	变化率 Slope	均值 Mean	变化率 Slope
平均温度 Mean temperature/℃										
天津	8.0	0.02	18.4	0.04	4.0	0.01	16.4	-0.07	21.4	-0.06**
石家庄	9.2	0.06**	18.1	0.01	5.3	0.06**	15.8	-0.05**	21.4	-0.02
莘县	8.3	0.03*	15.8	-0.06	4.3	0.03	14.3	-0.03	19.7	-0.04
徐州	9.8	0.04**	17.8	0.06	6.0	0.04**	13.0	-0.07	20.1	-0.06**
驻马店	9.7	0.03*	16.9	-0.05	6.4	0.02	12.1	-0.04	18.8	-0.05**
太阳辐射量 Solar radiation/(MJ · m <sup>-2</sup> · d <sup>-1</sup> )										
天津	3463	-12.7**	120	0.16	2138	-10.9**	387	-6.30**	819	4.35**
石家庄	3279	-6.34	100	1.06**	1914	-11.1**	414	-1.53	851	5.19**
莘县	3148	-6.98**	127	2.75**	1787	-10.1**	431	-0.74	804	1.11
徐州	3156	-10.4**	110	0.06	1633	-14.8**	554	3.11	859	1.22
驻马店	2766	-12.5**	118	0.15	1484	-16.2**	394	0.30	769	3.22
相对湿度 Relative humidit/%										
天津	57.0	0.08	66.4	0.24	57.1	0.13	50.9	-0.12	57.4	-0.20
石家庄	56.2	-0.22*	65.2	-0.42	56.2	-0.24	51.1	-0.04	57.0	-0.21
莘县	66.6	0.03	73.4	-0.43*	66.0	0.04	63.4	0.19	69.3	-0.02
徐州	65.3	0.07	69.7	0.06	66.4	0.11	60.7	-0.01	63.8	0.02
驻马店	69.9	-0.19	70.7	-0.28	70.0	-0.13	70.6	-0.43**	69.7	-0.26

续表

站点 Station	全生育期 Whole growth period		播种—出苗期 Sowing to Seeding stage		出苗—拔节期 Seeding to jointing stage		拔节—抽穗期 Jointing to heading stage		抽穗—成熟期 Heading to maturity stage	
	均值 Mean	变化率 Slope	均值 Mean	变化率 Slope	均值 Mean	变化率 Slope	均值 Mean	变化率 Slope	均值 Mean	变化率 Slope
风速 Wind speed/( m/s)										
天津	2.41	0.01	1.97	-0.00	2.33	0.01	3.03	0.01	2.61	0.05
石家庄	1.75	-0.02 **	1.31	-0.02 **	1.67	-0.02 **	2.22	-0.03 **	1.96	-0.02 **
莘县	2.90	-0.02 **	2.51	-0.03 **	2.82	-0.02 **	3.41	-0.04 **	3.06	-0.04 **
徐州	2.26	-0.02 **	1.95	-0.03 *	2.09	-0.02 **	2.64	-0.02 *	2.66	-0.02 **
驻马店	2.34	-0.03 **	2.09	-0.05 **	2.33	-0.03 **	2.48	-0.01	2.39	-0.03 **
降水 Precipitation/mm										
天津	136.1	0.31	14.58	1.20	50.70	-0.32	19.81	-0.74	50.99	0.17
石家庄	136.3	0.48	5.66	0.29	58.58	-0.36	14.99	0.14	57.05	0.42
莘县	143.2	-0.42	9.31	-0.23	55.99	-0.50	15.93	0.56	61.99	-0.24
徐州	256.5	-1.28	11.98	-0.90	118.0	-0.18	33.72	0.29	92.79	-0.49
驻马店	305.5	-1.59	17.99	-1.52 *	145.3	-1.00	40.53	0.95	101.6	-0.02

2.3 冬小麦不同生育阶段干旱特征的气候发展趋势分析

为了探究黄淮海平原冬小麦生育阶段干旱的气候影响因素,将各阶段的相对湿度与相应时段的气候要素做相关分析。由表 5 可以看出,相对湿度与温度的相关性在冬小麦的生育后期要大于生育前期,在冬小麦全生育期,天津与石家庄的相对湿度与温度为负相关,相关系数分别为-0.19 与-0.17,变化率为负值,即温度越高则相对湿度度越小,表现为越干旱,结合表 4 可知,黄淮海平原冬小麦全生育期的温度是显著升高的,因此,天津和石家庄由于温度的升高,会导致干旱化的加重,而莘县、徐州和驻马店则正好相反,随着温度的升高而出现湿润化的趋势,且莘县与徐州在播种—出苗与出苗—拔节期也是如此;在拔节—抽穗期与抽穗—成熟期,相对湿度与平均温度的相关系数较大,徐州在这两个生育阶段与驻马店在拔节—抽穗期都通过了 $\alpha<0.01$ 的显著性检验,且石家庄、徐州、驻马店在这两个生育阶段与莘县在抽穗—成熟期相对湿度与平均温度都呈负相关,变化率为负值,其中徐州与驻马店在抽穗—成熟期的变化率达-0.19 与-0.12,而结合表 4 可知,黄淮海平原在冬小麦拔节—抽穗与抽穗—成熟期温度有降低的趋势,因此,以上站点在相应生育阶段的干旱程度将会随着温度的降低有所减弱。对相对湿度与太阳辐射量的相关分析可以看出,在播种—出苗与抽穗—成熟期两者为负相关,且

相关系数较其他生育阶段大,其中石家庄在抽穗—成熟期的相关系数达-0.50,且通过了 $\alpha<0.01$ 的显著性检验,而在全生育期则为正相关,相对湿度随太阳辐射量的变化率除播种—出苗期都为负值,其他生育阶段变化率基本为 0,即太阳辐射量的增减不会引起相对湿润度的变化,在播种—出苗期,天津与徐州的相关系数通过了 $\alpha<0.05$ 的显著性检验,分别为-0.39 和-0.37,结合表 4 可知,在播种—出苗期黄淮海平原的太阳辐射量为增加的趋势,所以这一阶段这两个地区将会随着太阳辐射量的增加而呈干旱化的趋势;在出苗—拔节期,其他站点相对湿度与太阳辐射都为正相关,而徐州则为负相关,相关系数为-0.36,且通过了 $\alpha<0.05$ 的显著性检验。从表中可以看出,相对湿度与相对湿润度的相关性最大,各生育阶段的相关系数都通过了 $\alpha<0.01$ 的显著性检验,且变化率均为正值,结合表 4 可知,石家庄与驻马店在各生育阶段的相对湿度均为减小的趋势,因此,这两个站点将会随着相对湿度的减小而有干旱化的趋势;另外,徐州在各生育期的相关系数大于其他站点,即干旱程度与相对湿度的相关性最大。相对湿度与风速也表现出一定的相关性,这主要是由于风速对下垫面的蒸发状况的影响而造成的,在全生育期与生育后期,两者呈负相关关系,变化率为负值,在拔节—抽穗与抽穗—成熟,天津与石家庄呈显著的负相关,而在生育前期大多站点为正相关,且生育后期与风速的相关系数要大于生育前期;结合

表 4 可知,在全生育期和抽穗—成熟期,莘县、徐州和驻马店的风速为减小的趋势,由此可知,黄淮海南部地区在冬小麦全生育期和抽穗—成熟期将会随着风速的减小而呈湿润化的趋势。

表 5 黄淮海平原近 30 年冬小麦生育阶段相对湿度与气候要素的相关系数

Table 5 The correlation coefficient of relative moist index with climate factors in growth stages of winter wheat in 3H Plain

站点 Station	全生育期 Whole growth period		播种—出苗期 Sowing to Seeding stage		出苗—拔节期 Seeding to jointing stage		拔节—抽穗期 Jointing to heading stage		抽穗—成熟期 Heading to maturity stage	
	变化率 Slope	相关系数 Correlation coefficient	变化率 Slope	相关系数 Correlation coefficient	变化率 Slope	相关系数 Correlation coefficient	变化率 Slope	相关系数 Correlation coefficient	变化率 Slope	相关系数 Correlation coefficient
平均温度 Mean temperature/℃										
天津	-0.03	-0.19	0.06	0.05	-0.00	-0.01	-0.05	-0.23	0.00	0.00
石家庄	-0.03	-0.17	-0.09	-0.21	-0.03	-0.21	-0.07	-0.34	-0.09	-0.29
莘县	0.01	0.05	0.00	0.01	0.04	0.27	0.02	0.10	-0.07	-0.30
徐州	0.06	0.15	0.01	0.01	0.10	0.26	-0.06	-0.37 **	-0.19	-0.44 **
驻马店	0.02	0.04	-0.09	-0.08	-0.04	-0.11	-0.12	-0.41 **	-0.12	-0.25
太阳辐射量 Solar radiation/( MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )										
天津	0.00	0.30	-0.03	-0.39 *	0.00	0.10	-0.00	-0.22	-0.00	-0.24
石家庄	0.00	0.33	-0.01	-0.15	0.00	0.18	0.00	0.10	-0.00	-0.50 **
莘县	0.00	0.15	-0.01	-0.33	0.00	0.05	-0.00	-0.25	-0.00	-0.25
徐州	0.00	0.03	-0.02	-0.37 *	-0.00	-0.36 *	0.00	0.13	-0.00	-0.30
驻马店	0.00	0.13	-0.01	-0.21	0.00	0.15	0.00	0.04	-0.00	-0.12
相对湿度 Relative humidit/%										
天津	0.01	0.23	0.14	0.56 **	0.00	0.23	0.03	0.64 **	0.02	0.60 **
石家庄	0.02	0.70 **	0.04	0.41 **	0.02	0.75 **	0.02	0.61 **	0.02	0.73 **
莘县	0.01	0.36 *	0.07	0.59 **	0.01	0.47 **	0.02	0.55 **	0.02	0.52 **
徐州	0.05	0.73 **	0.13	0.59 **	0.06	0.75 **	0.03	0.73 **	0.05	0.75 **
驻马店	0.03	0.65 **	0.22	0.72 **	0.03	0.56 **	0.03	0.45 **	0.05	0.71 **
风速 Wind speed/( m/s)										
天津	-0.09	-0.33	0.08	0.02	-0.05	-0.21	-0.27	-0.37 *	-0.12	-0.23
石家庄	-0.25	-0.46 **	-0.94	-0.30	-0.18	-0.35	-0.22	-0.42 *	-0.47	-0.55 **
莘县	-0.06	-0.13	0.02	0.01	0.00	0.00	-0.14	-0.27	-0.11	-0.20
徐州	-0.01	-0.01	0.88	0.29	0.06	0.05	-0.12	-0.12	-0.29	-0.17
驻马店	-0.05	-0.08	2.18	0.47 **	0.06	0.09	-0.01	-0.01	-0.16	-0.15

3 结论与讨论

(1)黄淮海平原冬小麦除苗期外其它生育阶段干旱由北向南逐渐减轻,在冬小麦播种—出苗期黄淮海平原南部有干旱化的趋势,而北部有干旱减弱的趋势,全生育期也有相同的微弱的趋势;在出苗—拔节期干旱最为严重,呈现北部微弱干旱化而南部湿润化的趋势,抽穗—成熟期呈干旱化的趋势,且从北向南干旱变化幅度递增。

(2)在冬小麦全生育期,天津与石家庄主要以中旱和重旱为主,而莘县轻旱、中旱和重旱的频率相当,徐州与驻马店则以轻旱为主。天津、石家庄的干

旱持续较为严重,而驻马店近 30 年无干旱的持续。

(3)在拔节—抽穗期和抽穗—成熟期,徐州、驻马店的干旱程度随着温度的降低有减弱趋势。播种—出苗期,天津与徐州随着太阳辐射量的增加将呈干旱化的趋势;另外,石家庄与驻马店在冬小麦各生育阶段将会随着相对湿度的减小而有干旱化的趋势;黄淮海南部地区在冬小麦全生育期和抽穗—成熟期将会随着风速的减小而呈湿润化的趋势。

近 30 年黄淮海平原冬小麦的各生育阶段,不仅中等干旱程度以上频率较高,且在时间上也有持续性,持续的干旱更会影响冬小麦的生产,导致产量下降。从区域分布来看,天津、石家庄的干旱持续较为

严重,这与气象灾害记载资料相符<sup>[27-28]</sup>。在播种—出苗期,特旱发生的频率非常高,这与实际的农业气象干旱有所差异,因为黄淮海平原降水主要集中在7—8月,至冬小麦播种与苗期时,土壤或因水分滞存或因灌溉而有一定的底墒<sup>[29]</sup>,实际生产中干旱程度并不严重。这一现象主要是由于相对湿润度是根据作物参考蒸散量计算而得,而在冬小麦播种—出苗期植株覆盖度小,按照参考作物来计算的相对湿润度显然夸大了这一时期的干旱实情。另外,本文主要是从气象干旱的角度,探究了黄淮海平原冬小麦生育阶段的干旱特征及气候趋势的影响,在气候变化的背景下为冬小麦具体关键生育期的生产实践提供更为明确的抗旱依据,但是由于黄淮海平原大部分冬小麦种植区域都有灌溉的措施,并且前期的降水对当前的土壤墒情有着重要的影响,气象干旱的发生不一定会伴随农业干旱的发生<sup>[30]</sup>,因此,在生产过程中还要根据实际的小麦受旱状况而进行科学的抗旱。

## References:

- [ 1 ] Ma Z G. Dry/wet variation and its relationship with regional warming in arid—regions of northern China. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(5): 1011-1018.
- [ 2 ] Obasi G O P. WMO's role in the international decade for natural disaster reduction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1994, 75(9): 1655-1661.
- [ 3 ] Sheffield J, Wood E F. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate Dynamics*, 2008, 13(1): 79-105.
- [ 4 ] Dai A. Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2010, 2(1): 45-65.
- [ 5 ] Christopher B, Vicente B, Thomas F S, Qin D H. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2012: 109-230.
- [ 6 ] Wang Z W, Zhai P M. Climate change in drought over northern China during 1950—2000. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58 (Suppl): 61-68.
- [ 7 ] Zhang Q, Gao G. The spatial and temporal features of drought and flood disasters in the past 50 years and monitoring and warning services in China. *Science & Technology Review*, 2004, (7): 21-24.
- [ 8 ] LI X Z, Liu X D, Ma Z G. Analysis on the drought characteristics in the main arid regions in the world since recent hundred-odd years. *Arid Zone Research*, 2004, 21(2): 97-103.
- [ 9 ] Li S, Lü H Q, Zhang Y H, Han L J, Yang F Y, Wu C. Spatial-Temporal distribution characteristics of dryness/wetness over Huanghuaihai region from 1961 to 2006. *Meteorological Science and Technology*, 2008, 36(5): 601-605.
- [ 10 ] Zhang F M, Shen S H. A Study on dry/wet conditions and changes of dry/wet climate boundary in China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2008, 31(4): 574-579.
- [ 11 ] Huang H P. Characteristics and causes of drought in China from 1949 to 2007. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(11): 94-98.
- [ 12 ] Wang C Y. *Research Progress on Major Agricultural Meteorological Disasters*. Beijing: Meteorological Press, 2007: 1-29.
- [ 13 ] Zhao J F, Guo J P, Xu J W, Mao F, Yang X G, Zhang Y H. Trends of Chinese dry-wet condition based on wetness index. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8): 18-24.
- [ 14 ] Hao J J, Lu G H, Yan G X, Wu Z Y. Analysis of drought trend in Huanghuaihai plain based on climate change. *Water Resources and Power*, 2010, 28(11): 12-14.
- [ 15 ] Editorial Board of China Agricultural Yearbook. *China Agricultural Yearbook*. Beijing: China Agricultural Press, 2008: 179-180.
- [ 16 ] Jin Z Q. *Impact Simulation Studies of Global Change on China's Food Production [D]*. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 1996.
- [ 17 ] Wang S Y, Huo Z G, Li S K, Lu Z G, Zhuang L W, Hou T T. Risk assessment of drought effect on yield of winter wheat in northern China. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3): 118-125.
- [ 18 ] Fang W J, Zhang X F, Zheng Y F. Influence of drought on filling velocity of winter wheat during filling period. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2006, 27(2): 98-101.
- [ 19 ] Cong J O, Li N, Xu Y J, Gu W, Le Z Y, Huang S Q, Xi B, Lei Y. Relationship between indices of growth, physiology and reflectivity and yield of winter wheat under water stress. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 67-71.
- [ 20 ] Song Y L, Dong W J. Influence of drought on winter wheat yield in China during 1961—2000. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(6): 235-240.
- [ 21 ] Wang H, Chen F, Shi Q H, Fan S C, Chu Q Q. Analysis of factors on impacting potential productivity of winter wheat in Huanghuaihai agricultural area over 30 years. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(S): 90-95.
- [ 22 ] Liu X H, Chen F. *Farming System in China*. Beijing: China Agricultural Press, 2005.



- [23] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 152-223.
- [24] Jin S B. China Wheat. Beijing: China Agricultural Press, 1996.
- [25] Wang J R, Li S X. Effect of water-limited deficit stress in different growth stages on winter grain yields and their yield constituents. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(2): 193-200.
- [26] IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [27] Wen K G, Zang J S. Meteorological Disaster Canon of China · Hebei Volume. Beijing: Meteorological Press, 2007.
- [28] Wen K G, Wang Z X. Meteorological Disaster Canon of China · Tianjin Volume. Beijing: Meteorological Press, 2008.
- [29] An S Q, Liu G S, Lü H Q, Lin R N, Bai Y M, Guo A H. Research on water supply characteristics of soil moisture before sowing of winter wheat. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2000, 11(Suppl): 119-127.
- [30] Zheng D W. Anti-drought based on scientific principles-a case study on combating drought and protecting wheat in 2009. *Journal of Catastrophology*, 2010, 25(1): 7-12.
- [11] 黄会平. 1949—2007 年全国干旱灾害特征、成因及减灾对策. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 94-98.
- [12] 王春乙. 重大农业气象灾害研究进展. 北京: 气象出版社, 2007: 1-29.
- [13] 赵俊芳, 郭建平, 徐精文, 毛飞, 杨晓光, 张艳红. 基于湿润指数的中国干湿状况变化趋势. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 18-24.
- [14] 郝晶晶, 陆桂华, 闰桂霞, 吴志勇. 气候变化下黄淮海平原的干旱趋势分析. *水电能源科学*, 2010, 28(11): 12-14.
- [15] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2008: 179-180.
- [16] 金之庆. 全球气候变化对中国粮食生产影响的模拟研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 1996.
- [17] 王素艳, 霍治国, 李世奎, 卢志光, 庄立伟, 侯婷婷. 干旱对北方冬小麦产量影响的风险评估. *自然灾害学报*, 2003, 12(3): 118-125.
- [18] 房稳静, 张雪芬, 郑有飞. 冬小麦灌浆期干旱对灌浆速率的影响. *中国农业气象*, 2006, 27(2): 98-101.
- [19] 丛建鸥, 李宁, 许映军, 顾卫, 乐章燕, 黄树青, 席宾, 雷随. 干旱胁迫下冬小麦产量结构与生长、生理、光谱指标的关系. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1): 67-71.
- [20] 宋艳玲, 董文杰. 1961—2000 年干旱对我国冬小麦产量的影响. *自然灾害学报*, 2006, 15(6): 235-240.
- [21] 王宏, 陈阜, 石全红, 范士超, 褚庆全. 近 30 a 黄淮海农作区冬小麦单产潜力的影响因素分析. *农业工程学报*, 2010, 26(增刊): 90-95.
- [22] 刘巽浩, 陈阜. 中国农作制. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [24] 金善宝. 中国小麦学. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [25] 王俊儒, 李生秀. 不同生育时期水分有限亏缺对冬小麦产量及其构成因素的影响. *西北植物学报*, 2000, 20(2): 193-200.
- [27] 温克刚, 臧建升. 中国气象灾害大典(河北卷). 北京: 气象出版社, 2007.
- [28] 温克刚, 王宗信. 中国气象灾害大典(天津卷). 北京: 气象出版社, 2008.
- [29] 安顺清, 刘庚山, 吕厚荃, 林日暖, 白月明, 郭安红. 冬小麦底墒供水特征研究. *应用气象学报*, 2000, 11(增刊): 119-127.
- [30] 郑大玮. 论科学抗旱——以 2009 年的抗旱保麦为例. *灾害学*, 2010, 25(1): 7-12.

#### 参考文献:

- [1] 马柱国. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系. *地球物理学报*, 2005, 48(5): 1011-1018.
- [6] 王志伟, 翟盘茂. 中国北方近 50 年干旱变化特征. *地理学报*, 2003, 58(增刊): 61-68.
- [7] 张强, 高歌. 我国近 50 年旱涝灾害时空变化及监测预警服务. *科技导报*, 2004, (7): 21-24.
- [8] 李新周, 刘晓东, 马柱国. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析. *干旱区研究*, 2004, 21(2): 97-103.
- [9] 李森, 吕厚荃, 张艳红, 韩丽娟, 杨霏云, 吴超. 黄淮海地区 1961—2006 年干湿状况时空变化. *气象科技*, 2008, 36(5): 601-605.
- [10] 张方敏, 申双和. 中国干湿状况和干湿气候界限变化研究. *南京气象学院学报*, 2008, 31(4): 574-579.



# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.10 May, 2014 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

- Landscape sustainability and landscape sustainability science ..... ZHAO Wenwu, FANG Xuening (2453)
- A diagnostic framework of payments for ecosystem services and associated case studies .....  
..... ZHU Wenbo, WANG Yang, LI Shuangcheng (2460)
- Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants .....  
..... LIU Chunying, CHEN Chunli, GONG Xiaofeng, et al (2470)
- Ecological effects of predator chemical cues in aquatic ecosystem ..... QIN Guangqiu, LU Haoliang, TANG Zhenzhu, et al (2481)
- Secondary substances and their ecological effects on seed dispersal in vertebrate-dispersed fleshy fruit plants .....  
..... PAN Yang, LUO Fang, LU Changhu (2490)

### Autecology & Fundamentals

- Responses of CH<sub>4</sub> uptake rates to simulated N deposition in a nature forest in mid-subtropical China .....  
..... CHEN Chaoqi, YANG Zhijie, LIU Xiaofei, et al (2498)
- Ecological characteristics of *Phragmites australis* and their relationship to water-salt indicators in dry habitats of the southern  
marginal zones of the Tarim Basin, China ..... GONG Lu, ZHU Meiling, TASHPOLAT · Tiyp, et al (2509)
- Threshold effect of soil moisture on photosynthetic and physiological parameters in *Rosa xanthina* L. and its photosynthetic  
productivity classification ..... ZHANG Shuyong, XIANG Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (2519)
- Contrasting responses of soil respiration to litter manipulation in subtropical *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata*  
plantations ..... YU Zaipeng, WAN Xiaohua, HU Zhenhong, et al (2529)
- Potassium application for increased jasmonic acid content and defense enzyme activities of wheat leaves infested by aphids .....  
..... WANG Yi, ZHANG Yueling, SU Janwei, et al (2539)
- Combined effects of elevated O<sub>3</sub> concentration and reduced solar irradiance on photosynthetic activity and energy dissipation  
of winter wheat ..... SUN Jian, ZHENG Youfei, et al (2548)
- Colonization dynamics of *Bacillus cereus* B3-7 on wheat roots and control efficiency against sharp eyespot of wheat .....  
..... HUANG Qiubin, ZHANG Ying, LIU Fengying, et al (2559)
- Quantitative study of water consumption characteristics of winter wheat under deficit irrigation .....  
..... ZHANG Xingjuan, XUE Xuzhang, GUO Wenzhong, et al (2567)
- Assessment on the ecological fitness of anti-fungal transgenic rice ..... LI Wei, GUO Jianfu, YUAN Hongxu, et al (2581)
- A proteomic analysis of *Arachis hypogaea* leaf in responses to enhanced ultraviolet-B radiation .....  
..... DU Zhaokui, LI Junmin, ZHONG Zhangcheng, et al (2589)
- Composition of fatty acids from suspended particulate matter in southern South China Sea .....  
..... LIU Huaxue, KE Changliang, LI Chunhou, et al (2599)
- The influence of age, flock size, habitat, and weather on the time budget and the daily rhythm of wintering Siberian Cranes  
in Poyang Lake ..... YUAN Fangkai, LI Yankuo, LI Fengshan, et al (2608)
- The energy budget and water metabolism heat regulation of tree sparrows *Passer montanus* of toba compensatory regeneration .....  
..... YANG Zhihong, WU Qingming, YANG Miao, et al (2617)
- The effect of low-dose of pesticide on predation of spider and its preliminary mechanisms ..... LI Rui, LI Na, LIU Jia, et al (2629)
- Response of the alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Coleoptera: Chrysomelidae) to overwintering protection and  
its controlling effect on alligator weed *Alternanthera philoxeroides* (Amaranthaceae: Alternanthera) .....  
..... LIU Yufang, WANG Xiuxiu, LI Fei, et al (2638)

### Population, Community and Ecosystem

- The effect of climate change on the population fluctuation of the Siberian crane in Poyang Lake ..... LI Yankuo, QIAN Fawen, SHAN Jihong, et al (2645)
- Characteristics of soil phosphorus fractions in wetlands with various restoration age in caizi lake, Anhui Province ..... LIU Wenjing, ZHANG Pingjiu, DONG Guozheng, et al (2654)
- Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan Lake Wetland ..... LI Ranran, ZHANG Guangxin, ZHANG Lei (2663)
- Diversity of methanogen communities in tidal freshwater and brackish marsh soil in the Min River estuary ..... ZENG Zhihua, YANG Minhe, SHE Chenxing, et al (2674)
- The influence of environment and phylogenic background on variation in leaf and fine root traits in the Yanhe River catchment, Shaanxi, China ..... ZHENG Ying, WEN Zhongming, SONG Guang, et al (2682)
- Changes of soil properties in re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in hengyang of Hunan Province, South-central China ..... YANG Ning, ZOU Dongsheng, YANG Manyuan, et al (2693)
- Vulnerability assessment on the mangrove ecosystems in qinzhou bay under sea level rise ..... LI Shasha, MENG Xianwei, GE Zhenming, et al (2702)
- Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China ..... DU Hu, ZENG Fuping, WANG Kelin, et al (2712)
- Fungal diversity in *Cunninghamia lanceolata* plantation soil ..... HE Yuanhao, ZHOU Guoying, WANG Shenjie, et al (2725)
- Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land ..... ZHANG Lamei, LIU Xinping, ZHAO Xueyong, et al (2737)
- Characteristics of carbon storage and sequestration of *Robinia pseudoacacia* forest land converted by farmland in the Hilly Loess Plateau Region ..... SHEN Jiapeng, ZHANG Wenhui (2746)

### Landscape, Regional and Global Ecology

- Forest microclimate change along with the succession and response to climate change in south subtropical region ..... LIU Xiaodong, ZHOU Guoyi, CHEN Xiuzhi, et al (2755)
- Drought variations of winter wheat in different growth stages and effects of climate trend in Huang-Huai-Hai Plain, China ..... XU Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al (2765)

### Resource and Industrial Ecology

- A method of environment assessment of mineral resources planning for shanxi provinces base on GIS ..... LIU Wei, DU Peijun, LI Yongfeng (2775)
- A new approach to assess the water footprint of hydropower: a case study of the Miyun reservoir in China ..... ZHAO Dandan, LIU Junguo, ZHAO Xu (2787)

# 《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 祖元刚

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 10 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 10 (May, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	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