

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

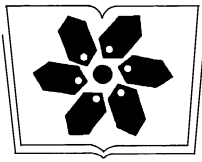
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第9期 Vol.34 No.9 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 9 期

2014 年 5 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 基于土壤食物网的生态系统复杂性-稳定性关系研究进展 陈云峰,唐 政,李 慧,等 (2173)
- 滇西北高原入湖河口退化湿地生态修复效益分析..... 符文超,田 昆,肖德荣,等 (2187)
- 典型峰丛洼地耕地、聚落及其与喀斯特石漠化的相互关系——案例研究
..... 李阳兵,罗光杰,白晓永,等 (2195)
- 青藏高原东缘高寒草原有毒植物分布与高原鼠兔、高原麝鼠的相关性 ... 金 樑,孙 莉,崔慧君,等 (2208)
- 周边不同生境条件对茶园蜘蛛群落及叶蝉种群时空结构的影响..... 黎健龙,唐劲驰,黎秀娣,等 (2216)

个体与基础生态

- 三峡库区马尾松林土壤-凋落物层酶活性对凋落物分解的影响 葛晓改,肖文发,曾立雄,等 (2228)
- 芦苇、香蒲和蘆草 3 种挺水植物的养分吸收动力学 张熙灵,王立新,刘华民,等 (2238)
- 沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土壤 C、N、P 化学计量特征影响 ... 胡启武,聂兰琴,郑艳明,等 (2246)
- 内蒙古典型草原小叶锦鸡儿灌丛化对水分再分配和利用的影响 彭海英,李小雁,童绍玉 (2256)
- 遮阴对米槠和杉木原位排放甲烷的影响..... 陈细香,杨燕华,江 军,等 (2266)
- 桔小实蝇和番石榴实蝇对 6 种寄主果实的产卵选择适应性..... 刘 慧,侯柏华,张 灿,等 (2274)
- 鼠尾草属东亚分支的传粉模式..... 黄艳波,魏宇昆,葛斌杰,等 (2282)

种群、群落和生态系统

- 养分资源脉冲供给对几种微藻种间竞争的影响 李 伟 (2290)
- 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价..... 李静鹏,徐明锋,苏志尧,等 (2297)
- 黄土丘陵区植物功能性状的尺度变化与依赖 丁 曼,温仲明,郑 颖 (2308)
- 湘潭锰矿栎树叶片和土壤 N、P 化学计量特征 徐露燕,田大伦,王光军,等 (2316)
- 黄土高原春小麦农田蒸散及其影响因素..... 阳伏林,张 强,王文玉,等 (2323)
- 尾矿区不同植被恢复模式下高效固氮菌的筛选及 Biolog 鉴定..... 李 雯,阎爱华,黄秋娟,等 (2329)
- 四川理县杂谷脑干旱河谷岷江柏造林恢复效果评价..... 李东胜,罗 达,史作民,等 (2338)

景观、区域和全球生态

- 闽南-台湾浅滩渔场二长棘鲷群体景观多样性 蔡建堤,苏国强,马 超,等 (2347)
- 面向土系调查制图的小尺度区域景观分类——以宁镇丘陵区中一小区域为例.....
..... 卢浩东,潘剑君,付传城,等 (2356)

气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响..... 胡 玮,严昌荣,李迎春,等 (2367)

资源与产业生态

基于 LMDI 分解的厦门市碳排放强度影响因素分析 刘 源,李向阳,林剑艺,等 (2378)

可持续生计目标下的生态旅游发展模式——以河北白洋淀湿地自然保护区王家寨社区为例.....

..... 王 瑾,张玉钧,石 玲 (2388)

荔枝树干液流速率与气象因子的关系 凡 超,邱燕萍,李志强,等 (2401)

肿腿蜂类寄生蜂室内控害效能评价——以松脊吉丁肿腿蜂为例 展茂魁,杨忠岐,王小艺,等 (2411)

城乡与社会生态

内蒙古草原人类福祉与生态系统服务及其动态变化——以锡林郭勒草原为例.....

..... 代光烁,娜日苏,董孝斌,等 (2422)

基于农业面源污染分区的三峡库区生态农业园建设研究 刘 涓,谢 谦,倪九派,等 (2431)

“交通廊道蔓延”视角下山地城市典型样带空间格局梯度分析 吕志强,代富强,周启刚 (2442)

学术信息与动态

美国地理学家协会 2014 年会述评 孙然好,肖荣波 (2450)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 280 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2014-05



封面图说: 峰丛洼地石漠化——峰丛主要分布在云贵高原的边缘部分及桂西、桂西北地区,相对高度一般为 200—300m,高的可达 600m 以上。在峰丛之间,岩溶洼地、漏斗、落水洞很发育,常形成峰丛洼地或峰丛漏斗的组合形态。峰丛洼地中的土地相当贫瘠,由于当地人们依靠这些土地种植庄稼为生,石漠化的发展趋势已经越来越明显。尤其在土地承载力低、人口压力大的区域石漠化相当严重,研究峰丛洼地耕地资源分布、土地利用强度和石漠化发育状况之间的机理,有助于从本质上认识石漠化的发生,对石漠化治理实施科学指导。

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/stxb201308052022

胡玮, 严昌荣, 李迎春, 刘勤. 气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响. 生态学报, 2014, 34(9): 2367-2377.

Hu W, Yan C R, Li Y C, Liu Q. Impacts of climate change on winter wheat growing period and irrigation water requirements in the north china plain. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2367-2377.

气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响

胡 玮^{1,2}, 严昌荣^{1,2,*}, 李迎春^{1,3}, 刘 勤^{1,2}

(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. 农业部旱作节水农业重点实验室, 北京 100081; 3. 农业部农业环境重点实验室, 北京 100081)

摘要: 利用华北 4 个气象站点 1981—2010 年冬小麦的生育期数据和气象资料, 研究了华北平原典型区域冬小麦在气候变化条件下的生育期及各生育阶段灌溉需水量。结果表明: (1) 过去 30a 来, 华北地区冬小麦播种期和出苗期均有推迟趋势, 且高纬度站点的变化趋势明显, 其他生育期则呈提前趋势, 而冬小麦全生育期表现为缩短; (2) 华北冬小麦灌溉需水量在空间上从北到南、自东向西逐渐递减趋势; 在时间上, 东西部地区灌溉需水量变化趋势相反, 东部地区呈逐渐增加趋势, 而西部地区呈减小趋势; (3) 冬小麦生育阶段的灌溉需水量变化不相同, 播种—出苗、拔节—抽穗和抽穗—乳熟期灌溉需水量表现为减少趋势, 而出苗—拔节和乳熟—成熟期则表现为增加趋势。就冬小麦整个生育期而言, 华北西部地区灌溉需水量(北京密云站和石家庄栾城站)有减少趋势, 分别减少 6.72mm/10a 和 8.3mm/10a; 而华北东部地区(天津宝坻站和邢台南宫站)的趋势正好相反, 分别增加 2.6mm/10a 和 7.08mm/10a。6 个生育阶段灌溉需水量的年际波动程度依次为: 播种—出苗期>乳熟—成熟期>抽穗—乳熟期>拔节—抽穗期>出苗—拔节期>播种—成熟期; (4) 气象要素对灌溉需水量的影响较复杂, 其中灌溉需水量同有效降水量、相对湿度呈负相关, 且相关关系极显著, 与生育期长度存在微负相关关系, 与日照时数、平均温度和风速呈显著正相关。同时, 影响各生育阶段灌溉需水量的气象要素也存在差异, 主要包括有效降水量、相对湿度和风速等。

关键词: 冬小麦; 生育期; 气候变化; 灌溉需水量

Impacts of climate change on winter wheat growing period and irrigation water requirements in the north china plain

HU Wei^{1,2}, YAN Changrong^{1,2,*}, LI Yingchun^{1,3}, LIU Qin^{1,2}

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

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

Abstract: This paper investigated impacts of climate change on irrigation water requirement for winter wheat with consideration to growing period in the North China Plain (NCP), benefitting to make irrigation scheduling and adaptive strategy. Based on data from 4 typical meteorology stations including Beijing Miyun and Shijiazhuang Nangong stations in the west and Tianjin Baodi and Xingtai Nangong stations in the east and phenology data of winter wheat during 1981 to 2010, the objective of this study is to investigate impacts of climate change on winter wheat irrigation water requirements in growth stages. The results showed that the dates of sowing stage and seeding stage delayed and the more variation of trend was at high latitudes, while the others showed an advanced trend. Then the spatial variation of irrigation water requirement in the

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)

收稿日期: 2013-08-05; **修订日期:** 2014-02-13

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

NCP was decreasing from south to north in the past 30 years. And in temporal distribution study, there was a marked increase in east, but it was opposite in west area. The irrigation water requirement during the different growth stages made a different change with time. Except for a slight rise during the seeding to jointing stage in two stations and milky to maturity, the irrigation water requirements were reduced during the other growth periods. In the whole growth stages, the west sites were decreased by 6.72 mm/10a and 8.3 mm/10a, respectively. However, in the east sites, there was an increasing tendency of irrigation water requirements with 2.6 mm/10a and 7.08 mm/10a, respectively. Besides the order of annual fluctuation was: sowing to seeding stage>milky to maturity>heading to milk stage>jointing to heading stage>seeding to jointing stage > sowing to maturity. The influence of different meteorological elements on irrigation water requirement was relatively various. The relationship between irrigation water requirement and effective precipitation and related humidity was negative significant, to the contrary, the impact of wind speed, sunshine duration and mean temperature was positive. And correlation was slightly negative between irrigation water requirement and growth period length. The consequence would be more precise if growth period length was taken into consideration in the formula. Therefore, the main climatic factors influencing the irrigation water requirements were different in each growth stage. The prior impact factor was related humidity in jointing to heading stage, while the main factors were different between Beijing Miyun station and others even during the same period of heading to milky stage due to the different districts, which were mean temperature and related humidity, respectively. But for other growth stages, the influence of effective precipitation on irrigation water requirement was more important than other factors. Thus the results could become more realistic, which provided theoretical basis for the reasonable irrigation system and strategies of adapting to climate change.

Key Words: winter wheat; phenology period; climate change; irrigation water requirement

全球气候变暖将会对温度和降雨产生影响,从而直接影响土壤的湿度^[1],导致农业用水压力与日俱增。而我国农业生产用水占总用水量的 80%^[2],农业水资源短缺和灌溉水利用率低的问题一直存在,因此明确气候变化对农作物的灌溉需水量的影响很有必要。目前,气候变化对农作物灌溉需水量的影响受到许多学者的关注。如,Gunter Wriedt^[3]运用作物模型(EPIC)及作物分布和种植面积的统计数据,研究了欧洲不同地区的净灌溉需水量,并根据水分运输效率和灌溉管理,模拟出总的灌水量是田间需水量的 1.3—2.5 倍;C.S. De Silva^[4]研究发现在 A2 和 B2 情景下,20 世纪 50 年代斯里兰卡水稻灌溉需水量分别增加了 23% 和 13%;王卫光等^[5]基于统计降尺度模型(SDSM),研究了气候变化背景下长江中下游水稻水分需求变化。还有不少学者运用作物系数法和 GIS 来研究气候变化对作物水分的影响,如,J. A. Rodriguez Diaz^[6]对西班牙的瓜达尔基维尔河流域的作物灌溉需水量进行预测,发现在气候变化条件下,20 世纪 50 年代该流域农业灌溉用水显著增加 20%;韩冰等^[7]以辽宁营口灌区为例,分析了气候变化对水稻生育

期和灌溉需水量的影响,发现过去 60a 水稻生育期缩短了 12.7 d。由于气温上升导致农田腾发量增加,该区域水稻灌溉需水量都呈上升趋势。同时,国内外学者在气候变化对作物物候的影响上做了大量的研究。Estrella,Xiao 和 Wang jing^[8-10]研究发现气候变暖促使冬小麦品种更替,且缩短了冬小麦的生育期。国内学者^[11-14]研究得出中国北方小麦物候期变化主要受温度影响,气候变暖导致播种期推迟,成熟期提前,从而导致生育期缩短。

华北平原是中国冬小麦主产区之一,气候变化必然会影响到冬小麦生育期和其对水分的需求,从而影响到其产量和品质。在华北地区普遍升温的背景下,冬小麦灌溉需水量区域变化研究是一个重要研究内容,影响冬小麦灌溉需水量的驱动因素也需进一步明确。因此,本文以华北区为例,利用 1980—2010 年 4 个典型站点(图 1)的冬小麦生育数据和气象资料,研究了冬小麦生育期的变化和灌溉需水量的主要影响因素及其规律,为合理配置灌溉计划和提高水资源的利用效率提供重要的参数,为冬小麦种植制定适应气候变化措施提供科学的依据。

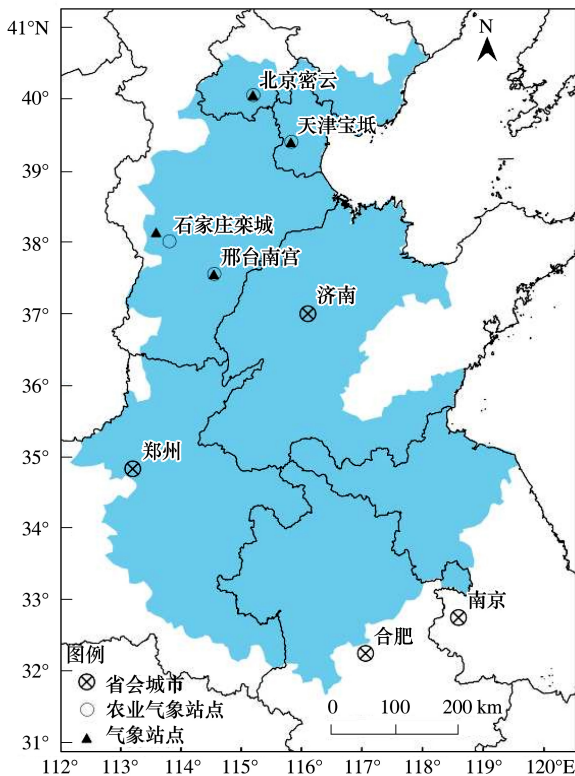


图1 华北平原典型气象站点分布图

Fig.1 The geographical location of meteorological stations in the North China Plain

1 材料与方法

1.1 研究站点概括

华北地区主要粮食作物有小麦、玉米、高粱、谷子、薯类等,是我国重要的粮棉产区,在研究区选取4个有代表性站点,分别是北京密云站、天津宝坻站、石家庄栾城站和邢台南宫站,各个站基本情况见表1。

1.2 资料来源

气象数据来源于中国气象科学共享网。选取数据记录较完整的4个代表性地面气象站1981—2010年逐日气象资料,其中包括平均气温(℃)、最高气温(℃)、最低气温(℃)、日照时数(h)、降水量(mm)、风速(m/s)、平均相对湿度(%)。对于气象数据的缺失,温度(平均、最高、最低温度)缺测值利用五日滑动平均法进行插补,降水量缺测值利用附近站点数据进行线性插补^[15]。

冬小麦生育期数据来源于北京密云站、天津宝坻站、石家庄栾城站、邢台南宫站1981—2010年的观测资料。因冬小麦生育期观测站和地面气象站(北京站、天津站、石家庄站、南宫站)并不完全一致,所以本文采用取就近匹配原则,选取了4个有连续的30a观测序列资料的农业气象站地与之对应。

表1 研究站点的基本情况

Table 1 Basic information of the four selected stations

站点 Station	纬度 Latitude	经度 longitude	海拔 Elevation/m	年平均降水量 Mean precipitation /mm	资料系列长度 年份 Year
北京密云	39°48′	116°28′	31.3	616.4	1981—2010
天津宝坻	39°05′	117°04′	25	553.7	1981—2010
石家庄栾城	38°02′	114°25′	81.0	539.2	1981—2010
邢台南宫	37°22′	115°23′	27.4	457.9	1981—2010

本文将冬小麦的整个生育期划分为5个生育阶段:播种—出苗期,出苗—拔节期、拔节—抽穗期、抽穗—乳熟期、乳熟—成熟期。根据冬小麦多年发育期资料,采用生育期日数的多年平均值来代表当地一般生育期日数。生育期日数按照“儒略日(Julian Day)”计算,即日期按照每年365d转化为“日序day”,1月1日即为1,以此类推。

1.3 灌溉需水量计算

冬小麦生育阶段有效降水量即冬小麦某一生育阶段内,降水中实际补充到小麦根层土壤的净水量,

代表总降水量中的有效部分。本文利用美国农业部土壤保持局推荐的有效降水量分析方法^[16-18]:

$$Pe = \begin{cases} P(4.17-0.2P)/4.17 & P < 8.3 \text{ mm/d} \\ 4.17+0.1P & P \geq 8.3 \text{ mm/d} \end{cases} \quad (1)$$

式中, Pe 为有效降水量(mm/d), P 为总降水量(mm/d)。

冬小麦生育期需水量的确定采用FAO推荐的公式^[19]:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

式中, ET_c 为作物需水量(mm/d), K_c 为作物系数,

ET_0 为参考作物蒸散量 (mm/d)。

参考作物蒸散量 (ET_0) 的计算采用 FAO (1998) 推荐的 Penman-Monteith 公式计算^[19]。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

式中, ET_0 为参考作物日蒸散量 (mm/d); R_n 为作物表面净辐射量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); γ 为湿度计常数 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); T 为平均气温 ($^\circ\text{C}$); U_2 为在地面以上 2m 高处的风速 (m/s); e_s 为空气饱和水汽压 (kPa); e_a 为空气实际水汽压 (kPa)。

根据冬小麦生长发育特征,在 FAO 推荐值^[19]基础上,根据分段单值平均法计算生育中期的作物系数。将生育期划分为初始生长期即从播种到作物覆盖率接近 10%,此阶段作物系数为 $K_{\text{cini}} = 0.7$ (播种—出苗期,出苗—拔节期,其中越冬期为 0.4);快速发育期也是生育中期即从覆盖率 10%到充分覆盖,此阶段作物系数为 $K_{\text{cmin}} = 0.15$ (拔节—抽穗期,抽穗—乳熟期);成熟期即从叶片开始变黄到生理成熟或收获,此阶段作物系数 $K_{\text{cend}} = 0.4$ (乳熟期—成熟期)。根据当地气候条件,将生育中期作物系数进行修正,即:

$$K_{\text{cmid}} = K_{\text{cmid}(\text{Tab})} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{\text{min}} - 45)](h/3)^{0.3} \quad (4)$$

式中, U_2 为 2m 高度处的日平均风速 (m/s), RH_{min} 为日最低相对湿度的平均值, h 为作物的平均高度 (m)。

灌溉需水量可以认为是生育期内总的作物需水量与生育期内总的有效降水量之差^[18,20-21],用公式表达为:

$$I_s = \sum_{n=1}^N ET_{cn} - \sum_{n=1}^N P_{en} \quad (5)$$

式中, N 为生育期日数 (d), ET_c 为作物需水量 (mm/d), P_e 为有效降水量 (mm/d), I_s 为灌溉需水量 (mm)。

1.4 气候趋势分析

作物灌溉需水量、生育期和气象要素的变化趋势采用气候趋势分析方法,气候倾向率由最小二乘法获得,计算公式为:

$$\hat{X}_i = a + b \cdot i \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

式中, $\hat{X}_i$ 为要素的拟合值; a 为回归常数; b 为回归系数, $b \times 10$ 称为气候倾向率,表示气候要素每 10 a 的变化量; i 为自然数列,代表年份序号;气候要素序列 $\hat{X}_i$ 与自然数列 i 之间的相关系数称为气候趋势系数,其显著性检验本文采用相关系数检验法。

1.5 离散系数计算

作物需水量和灌溉需水量的年际波动是规划和设计农田水利工程的重要依据,可用逐年作物灌溉需水量的标准差或离散系数来衡量其年际波动程度,但标准差与样本均值有关,当两组样本的均值存在显著差异时,用标准差便不能准确分辨哪组数据的离散程度更高,而离散系数指标既考虑了样本标准差大小又考虑了样本均值大小,便于两组数据离散程度的比较,采用离散系数来衡量作物灌溉需水量和生育期日数的年际波动程度,其计算公式为^[22]:

$$C_v = \sigma / \mu \quad (7)$$

式中, C_v 为离散系数; σ 为标准差; μ 为均值。 C_v 绝对值越大,表明年际波动越大,反之亦然。

2 结果与分析

2.1 冬小麦生育阶段气象要素变化特征

采用趋势分析法对 1981—2010 年的 4 个典型站冬小麦生长季内各气象要素的变化进行了分析,总体上,冬小麦播种—出苗期有效降水量变化趋势较显著,其中北京密云站、天津宝坻站和石家庄栾城站呈增加趋势,而北京密云站通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验 (表 2)。冬小麦其他生育阶段有效降水量基本呈增加趋势,但不存在显著性差异,其中北京密云站各生育阶段的有效降水量升幅范围 (0.1—6.29 mm/10a) 高于其他站点。由此可见,华北平原冬小麦生长季内有效降水量年际变化趋势不一致,且年际变化波动较大,与前人研究结果一致^[23]。

已有的研究结果显示,过去 50a 华北区气温上升幅度较大的地区之一^[24]。冬小麦生育期阶段,除了播种—出苗期温度有小幅下降趋势以外,其他阶段温度都呈上升趋势,且各站点不同生育阶段温度的升幅范围为 0.02—0.08 $^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。4 个站点的风速变化较不一致,石家庄栾城站冬小麦生育阶段风速

都呈减小趋势,且通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验,而其他站只有拔节—抽穗期风速呈减小趋势,其余生育阶段都呈增加趋势,但是趋势不显著。此外,石家

庄栾城站和邢台南宫站的日照时数和相对湿度呈下降趋势。

表 2 冬小麦不同生育阶段各气象要素的气候倾向率

Table 2 Climatic tendency rate of each climatic variable during different growth stages of winter wheat

站点 Station	生育期 Phenology	气候倾向率 Climatic tendency rate/10a					
		有效降水量 Effective precipitation/mm	需水量 Water requirement/mm	日照时数 Sunshine duration/h	相对湿度 Related humidity/%	平均温度 Mean temperature/℃	风速 Wind speed/ (m/s)
北京	播种—成熟期	6.29	-0.44	-60.35 **	-0.15	0.46 **	-0.03
密云	播种—出苗期	2.87 **	-0.77	-9.71 **	0.03	-0.26	0.02
	出苗—拔节期	1.37	3.70	-30.7	0.06	0.55 **	-0.04
	拔节—抽穗期	1.15	-3.40 *	-6.17	0.58	0.36	-0.19 *
	抽穗—乳熟期	0.95	0.38	-6.85	-2.32	0.16	0.10
	乳熟—成熟期	0.67	-0.67	-9.93 *	-0.68	0.02	0.00
天津	播种—成熟期	0.99	3.59	-76.35 **	0.88	0.21	0.05
宝坻	播种—出苗期	2.09 *	-1.74 **	-14.41 **	4.10	-0.61	-0.09
	出苗—拔节期	0.09	4.54	-43.29 *	1.65	0.27	0.08
	拔节—抽穗期	-0.61	0.13 **	-3.57	0.13	0.31	0.01
	抽穗—乳熟期	-0.34	1.09	-8.04	-1.60	0.24	0.05
	乳熟—成熟期	-0.16	0.20	-5.32	-2.11	0.16	0.01
石家庄	播种—成熟期	1.73	-6.57	-72.29 *	-1.99	0.67 **	-0.23 **
栾城	播种—出苗期	1.20	-1.05	-6.49	-0.88	-0.06	-0.24 **
	出苗—拔节期	-2.06	1.29	-53.50	-2.30	0.77 **	-0.23 **
	拔节—抽穗期	1.41	-3.82	-5.08	0.11	0.42	-0.36 **
	抽穗—乳熟期	1.58	-3.90	-9.37	-0.18	0.54 **	-0.27 **
	乳熟—成熟期	-0.83	0.34	0.61	-4.04	0.56	-0.16 **
邢台	播种—成熟期	1.50	8.58	-29.75	-0.57	0.46 **	0.06
南宫	播种—出苗期	-1.73 *	1.02	2.64	-4.14	0.83	0.05
	出苗—拔节期	0.44	7.85 *	-34.38	-0.50	0.52 **	0.08
	拔节—抽穗期	1.32	-1.03 *	-2.40	0.46	0.23	-0.04
	抽穗—乳熟期	2.61	-0.37	-1.33	0.66	0.34	-0.02
	乳熟—成熟期	-0.88	0.86	4.98	-2.91	0.19	0.03

2.2 气候变化对冬小麦生育期的影响

由表 3 可以看出,冬小麦的播种期和出苗期以及石家庄栾城站和邢台南宫站冬小麦成熟期均有推迟趋势,且北京密云站推迟幅度较大,为 6.12—6.84d/10a,均通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验;可以看出高纬度站点的变化趋势较大,且显著性较好。其他生育阶段生育期日数均表现为减小趋势,即生育阶段呈提前趋势,平均每 10a 提前 0.71—3.87d。与前人的研究结果一致^[25-27]。从年际波动来看,整体变化较一致,拔节期离散系数最大,为 0.03—0.06;而成熟期离散系数最小,为 0.01—0.02。6 个生育时期的年际波动程度依次为:拔节期>抽穗期>播种期=出苗期=乳熟期>成熟期。

由表 4 可以看出,高纬度站点北京密云站和天津宝坻站的全生育期长度比其他两个站点长。而近 30a 来,4 个站点的全生育期均表现为缩短,且北京密云站和天津宝坻站生育期缩短最为显著,均通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。

有研究发现,冬小麦播种期的变化与平均温度呈正相关,而与日照时数呈负相关^[25]。播种期推迟还可能和前茬玉米推迟收获有关,而拔节期提前的原因是日照时数减少,积温的增加导致冬小麦成熟期推迟^[25-26]。气候变化使我国的冬小麦种植区向北扩展,且适宜种植的品种向减弱冬性方向演化^[28-29]。由于近 30 年来,农作物的种植制度和品种更替的变化,对作物生育期的影响也是不可忽视的。

表 3 冬小麦生育期日数变化趋势
Table 3 Change in day of year for winter wheat

生育期 Phenology	生育期日数 Day of year/d							
	站点 Station	均值 Mean	离散系数 Coefficient	气候倾向率 Climatic tendency rate/10a ⁻¹	站点 Station	均值 Mean	离散系数 Coefficient	气候倾向率 Climatic tendency rate /10a ⁻¹
播种期 Sowing	北京密云	275	0.03	6.12 **	天津宝坻	273	0.02	3.05 **
出苗期 Seeding		284	0.03	6.84 **		281	0.02	4.00 **
拔节期 Jointing		112	0.05	-3.87 **		108	0.03	-0.78
抽穗期 Heading		132	0.03	-2.70 **		128	0.03	-3.56 **
乳熟期 Milky		153	0.03	-0.71		148	0.03	-2.17 **
成熟期 Maturity		168	0.02	-2.07 **		165	0.01	-0.58
播种期 Sowing	石家庄栾城	277	0.02	0.86	邢台南宫	286	0.02	1.48
出苗期 Seeding		285	0.02	1.71		294	0.02	1.72
拔节期 Jointing		99	0.04	-2.36 **		95	0.06	-1.73
抽穗期 Heading		120	0.03	-2.56 **		117	0.04	-3.00 **
乳熟期 Milky		140	0.02	-1.23		141	0.02	-0.40
成熟期 Maturity		160	0.01	0.51		157	0.02	-1.68 **

* 表示($P<0.05$), ** 表示($P<0.01$)

表 4 典型站点冬小麦生育期长度年际变化
Table 4 Variability of growth period length of meteorological stations

站点 Station	生育期长度 Growth period length/d			
	最大值 Max	最小值 Min	均值 Mean	气候倾向率 Climatic tendency rate/10a ⁻¹
北京密云站	271	243	257	-8.19 **
天津宝坻站	268	248	258	-3.63 **
石家庄栾城站	254	234	247	-0.35
邢台南宫站	249	224	236	-3.16 *

* 表示($P<0.05$), ** 表示($P<0.01$)

2.3 气候变化对冬小麦灌溉需水量的影响

2.3.1 冬小麦灌溉需水量变化

对 1981—2010 年北京密云站和石家庄栾城站冬小麦灌溉需水量变化的气候倾向率进行分析(表 5),可以得出,在抽穗期之前,北京密云站和天津宝坻站所需的灌溉需水量较多,这一生育阶段灌溉需水量有从南向北增加的趋势;而从抽穗期到成熟期刚好相反。从 4 个站点的需水强度(日平均灌溉需水量)来看(图 2),需水强度较大的生育阶段是拔节—抽穗期和抽穗—乳熟期,是其他生育阶段的 3—6 倍。从年际波动来看,南部站点的年际波动系数较大,但 4 个站点不同生育阶段的系数大小变化较一致。播种—出苗期的年际波动系数最大,北京密云站、天津宝坻站、石家庄栾城站和邢台南宫站分别为 0.53,0.44,0.91 和 0.61;而最小的是播种—成熟期,分别是 0.12,0.12,0.17 和 0.14。6 个生育阶段的年

际波动程度依次为:播种—出苗期>乳熟—成熟期>抽穗—乳熟期>拔节—抽穗期>出苗—拔节期>播种—成熟期。

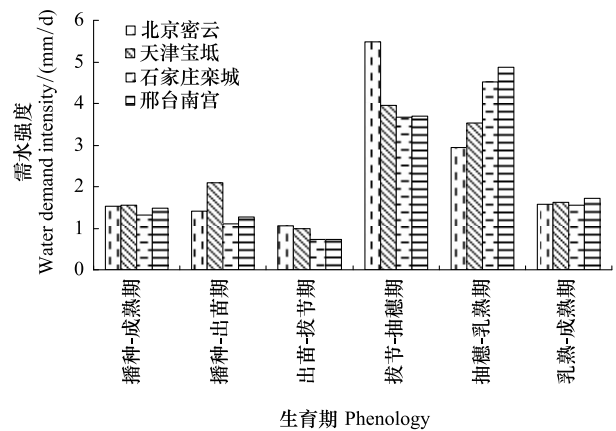


图 2 典型站点不同生育阶段需水强度
Fig.2 Water demand intensity in different growth stages for meteorological stations

华北地区冬小麦灌溉需水量在空间上从北向南、自东向西逐渐递减趋势;在时间上,东西部地区灌溉需水量变化趋势相反,东部地区呈逐渐增加趋势,而西部地区呈减小趋势。冬小麦各生育阶段的灌溉需水量随时间的变化不同,站点播种—出苗,拔节—抽穗阶段灌溉需水量均表现为不同程度的减少,但是趋势不显著,仅天津宝坻站通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验;而出苗—拔节和乳熟—成熟期则表

现为增加趋势。就整个生育期而言,西部站点(北京密云站和石家庄栾城站)有减少趋势,分别减少 $6.72\text{mm}/10\text{a}$ 和 $8.30\text{mm}/10\text{a}$,石家庄栾城站的变化幅度较大;而东部站点(天津宝坻站和邢台南宫站)的趋势正好相反,分别增加了 $2.60\text{mm}/10\text{a}$ 和 $7.08\text{mm}/10\text{a}$ 。但灌溉需水量变化均未通过显著性检验。

表 5 冬小麦不同生育阶段灌溉需水量变化趋势

Table 5 Change of irrigation water requirement during different growth stages of winter wheat

生育期 Phenology	灌溉需水量 Irrigation water requirement I_s/mm							
	站点 Station	均值 Mean	离散系数 Coefficient	倾向率 Tendency rate/ 10a	站点 Station	均值 Mean	离散系数 Coefficient	倾向率 Tendency rate/ 10a^{-1}
播种—成熟期	北京密云	398	0.12	-6.72	天津宝坻	368	0.12	2.60
播种—出苗期		13	0.53	-3.65		17	0.44	-3.83 *
出苗—拔节期		204	0.13	2.33		163	0.13	4.45
拔节—抽穗期		104	0.21	-4.55		87	0.27	0.75
抽穗—乳熟期		64	0.24	-0.57		85	0.17	1.43
乳熟—成熟期		24	0.43	-1.34		28	0.39	0.36
播种—成熟期	石家庄栾城	325	0.17	-8.30	邢台南宫	350	0.14	7.08
播种—出苗期		9	0.91	-2.25		10	0.61	2.75 *
出苗—拔节期		128	0.23	3.34		123	0.20	7.40
拔节—抽穗期		77	0.24	-5.24		81	0.19	-2.35
抽穗—乳熟期		90	0.25	-5.48		117	0.23	-2.98
乳熟—成熟期		31	0.37	1.17		29	0.40	1.74

* 表示 ($P < 0.05$)

2.3.2 冬小麦灌溉需水量变化的主要影响因素

上述结果表明:灌溉需水量及变化趋势,都存在明显的区域差异。本文利用 Pearson 相关分析法分析灌溉需水量和各气象要素之间的相关关系(表 6),发现两者之间存在着一定的相关关系,而且显著性较好。4 个站点之间同一气象要素的变化趋势存在一定的差异,不同气象要素与灌溉需水量的相关关系也不同,其中有效降水量对灌溉需水量的变化最为明显,它直接参与灌溉需水量的计算,与灌溉需水量关系密不可分。灌溉需水量同有效降水量、相对湿度呈负相关,且相关关系极显著 ($\alpha = 0.01$),与日照时数、平均温度和风速呈显著正相关,生育期长度虽没有直接参与灌溉需水量的计算过程,但在考虑气候变化对灌溉需水量的影响时,考虑生育期长度的变化是很有必要的^[30]。北京密云站和天津宝坻站生育期长度同灌溉需水量存在微弱负相关关系,而石家庄栾城站和邢台南宫站存在显著负相关

关系,整体趋势一致。说明考虑生育期长度变化,可以使灌溉需水量计算的结果更加精确。由于华北区的降雨主要集中在 6—9 月,冬小麦生育期推迟,可以有效减少冬小麦后期的灌溉量。

为了深入研究 4 个典型站点灌溉需水量变化的主要原因,本文选用线性逐步回归的统计方法分析了灌溉需水量与主要气候要素之间的关系。其中,有效降水量和相对湿度的变化对其影响最为突出,两者对它得贡献率都为负的。4 个站点线性回归方程的决定系数均达到了 0.8 以上。石家庄栾城站和邢台南宫站,除了播种—成熟期外,其他生育阶段的决定系数都高达 0.9 以上。

每个生育阶段灌溉需水量的变化的主要气象要素有不同,拔节—抽穗期最主要影响要素是相对湿度;抽穗—乳熟期,北京站和其他站有所区别,分别是平均温度和相对湿度,平均温度对它得贡献率是正的;其他生育阶段都是有效降水量。其次是日照

表 6 冬小麦不同生育阶段灌溉需水量与各气象要素的相关系数

Table 6 Partial correlation coefficient between I_s and climatic variables during different growth stages of winter wheat							
站点 Station	生育期 Phenology	灌溉需水量 Irrigation water requirement I_s					
		有效降水量 Effective precipitation	日照时数 Sunshine duration	相对湿度 Related humidity	平均温度 Mean temperature	风速 Wind speed	生育期长度 Growth period length
北京密云	播种—成熟期	-0.83 **	0.65 **	-0.81 **	0.25	0.52 **	-0.05
	播种—出苗期	-0.97 **	0.77 **	-0.64 **	0.27	0.11	-0.23
	出苗—拔节期	-0.78 **	0.64 **	-0.82 **	0.34	0.50 **	0.01
	拔节—抽穗期	-0.81 **	0.74 **	-0.91 **	0.47 **	0.71 **	-0.18
	抽穗—乳熟期	-0.79 **	0.59 **	-0.75 **	0.83 **	0.41 *	0.02
	乳熟—成熟期	-0.96 **	0.48 **	-0.76 **	0.49 **	0.42 *	-0.07
天津宝坻	播种—成熟期	-0.40 *	0.84 **	0.46 **	0.76 **	0.89 **	0.06
	播种—出苗期	-0.85 **	0.86 **	0.15 **	0.58	0.49	-0.17
	出苗—拔节期	-0.70 **	0.46 **	-0.54 **	0.24	0.52 **	0.03
	拔节—抽穗期	-0.83 **	0.76 **	-0.93 **	0.57 **	0.75 **	-0.04
	抽穗—乳熟期	-0.51 **	0.61 **	-0.80 **	0.72 **	0.49 **	-0.26
	乳熟—成熟期	-0.95 **	0.59 **	-0.67 **	0.58 **	0.43 *	-0.14
石家庄栾城	播种—成熟期	-0.90 **	0.65 **	-0.76 **	0.31	0.50 **	-0.22
	播种—出苗期	-0.97 **	0.86 **	-0.87 **	0.44 *	0.55 **	-0.40 *
	出苗—拔节期	-0.95 **	0.54 **	-0.85 **	0.50 **	0.35	-0.28
	拔节—抽穗期	-0.85 **	0.78 **	-0.88 **	0.36 *	0.56 **	-0.11
	抽穗—乳熟期	-0.85 **	0.84 **	-0.93 **	0.57 **	0.75 **	-0.44 *
	乳熟—成熟期	-0.94 **	0.52 **	-0.76 **	0.68 **	0.24	0.25
邢台南宫	播种—成熟期	-0.77 **	0.61 **	0.39 *	0.38 *	0.45 *	-0.24
	播种—出苗期	-0.93 **	0.74 **	0.02	0.53 **	0.47 **	-0.27
	出苗—拔节期	-0.83 **	0.54 **	0.18	0.47 **	0.27	-0.38 *
	拔节—抽穗期	-0.79 **	0.60 **	0.30	0.21	0.29	-0.12
	抽穗—乳熟期	-0.73 **	0.85 **	0.28	0.64 **	0.71 **	-0.06
	乳熟—成熟期	-0.96 **	0.84 **	0.27	0.69 **	0.41 *	0.02

时数、风速和生育期长度。过去的 30a,生育期内日照时数减少和风速降低导致作物需水量呈减小趋势。而需水量是灌溉需水量计算中的主要因子之一,必然导致灌溉需水量也会减少。

3 结论

- (1)过去 30a,冬小麦播种期和出苗期均有推迟趋势,且北京密云站推迟幅度较大,为 6.12—6.84d/10a,可以看出高纬度地区的变化趋势显著。其他生育阶段生育期日数均表现为减小趋势,即生育阶段呈提前趋势。
- (2)华北地区冬小麦灌溉需水量在空间上北多南少,有自东向西递减趋势;在时间上,东西部地区灌溉需水量变化趋势相反,东部地区呈逐渐增加趋势,而西部地区呈减小趋势。冬小麦各生育阶段的

灌溉需水量随时间趋势不同,播种—出苗、拔节—抽穗、抽穗—乳熟阶段灌溉需水量均表现为不同程度的减少趋势,而出苗—拔节和乳熟—成熟期则表现为增加趋势。就整个生育期而言,西部站点(北京密云站和石家庄栾城站)有减少趋势,分别减少 6.72mm/10a 和 8.3mm/10a;而东部站点(天津宝坻站和邢台南宫站)的趋势正好相反,分别增加 2.6mm/10a 和 7.08mm/10a。在抽穗期之前,北京密云站和天津宝坻站所需的灌溉需水量较多,这一生育阶段灌溉需水量有从南向北增加的趋势;而从抽穗期到成熟期刚好相反。从四个站点的日平均灌溉需水量来看,需水强度较大的生育阶段相同,是拔节—抽穗期和抽穗—乳熟期。6 个生育阶段灌溉需水量的年际波动程度依次为:播种—出苗期>乳熟—成熟期>抽穗—乳熟期>拔节—抽穗期>出苗—拔节期>

播种—成熟期。

(3)冬小麦灌溉需水量同有效降水量、相对湿度呈负相关,且相关关系极显著,与生育期长度存在微负相关关系;与日照时数、平均温度和风速呈显著正相关。若考虑生育期长度变化,可以使灌溉需水量计算的结果更加精确。每个生育阶段灌溉需水量的变化的主要气象影响要素不同,拔节—抽穗期最主要影响要素是相对湿度;抽穗—乳熟期,北京密云站和石家庄栾城站有所区别,分别是平均温度和相对湿度,平均温度对它得贡献率是正的;其他生育阶段都是有效降水量,其次是日照时数、风速和生育期长度。

4 讨论

影响灌溉需水总量的因素较复杂,前人研究的影响要素有作物播种面积^[3,31]、种植制度、海拔和纬度^[32]等。而本文从气象要素的角度考虑,明确冬小麦不同生育期的灌溉需水量及其影响因素。本文研究得出,有效降水量是影响冬小麦生育期内灌溉需水量的最主要指标。华北区站点近 30 年冬小麦生育期内的有效降水量表现为增加趋势,与前人研究的近 50 年华北区域年降水趋势不同^[33],主要是因为 20 世纪 90 年代以来冬小麦关键生育期的降水相对有所增加^[34-35]。同时由表 6 看出,冬小麦关键生育期的灌溉需水量主要受相对湿度影响,与梁丽乔、杜加强等^[36-37]研究松嫩平原及黄河上游生长季参考作物蒸散发对相对湿度最为敏感的结果相一致。其原因是这一时段有效降水虽有一定幅度的增加,但并不能完全满足冬小麦的生长需求。由于相对湿度的显著增加造成土壤湿度增加,同时降低田间温度,减小蒸发,对田间节水起到了持续保墒的关键性作用。也有学者研究表明作物水分变化主要受日照和风速^[38-40]影响。主要是由于日照减少使到达地面的能量减弱,导致地面蒸发减少;风速降低会使空气与土壤中的水分交换强度变低,有利于土壤水分的保持。大部分前人研究是基于作物全生育期,而本文细化到作物的每个生育阶段,同时结合气象要素和生育期来研究作物水分的内在变化影响因素,能使结果更加全面准确。由于数据搜集有限,本文结果在其它地区的适用性较弱,有待进一步研究。运用灌溉需水量的结果与农业实际生产、农机措施相结

合在节水的前提下提高作物产量将是下一步的研究重点。

在明确冬小麦生育期和灌溉需水量变化的基础上,有利于采用针对性措施,有效应对气候变化和促进小麦生产。如非充分灌溉技术,做到及时在小麦关键需水期补充供水,满足田间持水量下限 55—65%的灌溉量^[32],可以有效提高水分利用效率和产量^[41];通过合理施肥可以使土壤保持较高的含水量,产生水肥耦合效应^[42-44];选用晚熟品种延长冬小麦生育期,提高生物量累积,从而达到提高产量的目的。

References:

- [1] McKenney M S, Rosenberg N J. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimate methods to climate change. *Agric. Forest Meteorol*, 1993, 64:81-110.
- [2] Fang X Q, Chen Y H. Research progress of physiological and ecological basis for water-saving irrigation of winter wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(1):21-26.
- [3] Gunter W, Marijn V D V, Alberto A, Faycal B. Estimating irrigation water requirements in Europe. *Journal of Hydrology*, 2009, 373:527-544.
- [4] De Silva C S, Weatherhead E K, Knox J W, Rodriguez-Diaz J A. Predicting the impacts of climate change—A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka. *Agriculture water management*, 2007, 23:19-29.
- [5] Wang W G, Peng S Z, Sun F C, Xing W Q, Luo Y F, Xu J Z. Spatiotemporal variations of rice irrigation water requirements in the mid-lower reaches of Yangtze River under changing climate. *Advance In Water Science*, 2012, 23(5):656-664.
- [6] Rodríguez Díaz J A, Weatherhead E K, Knox J W, Camacho E. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Regional Environmental Change*, 2007, 7(3):149-159.
- [7] Han B, Luo Y F, Wang W G, Peng S Z, Jiao X Y. Impacts of climate change on rice growing period and irrigation water requirements. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(1):29-32.
- [8] Estrella N, Sparks T H, Menzel A. Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. *Glob. Change Biol*, 2007, 13:1737-1747.
- [9] Xiao D P, Tao F L, Liu Y J, Shi W J, Wang M, Liu F S, Zhang S, Zhu Z. Observed changes in winter wheat phenology in the North China Plain for 1981—2009. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 10:552-560.
- [10] Wang J, Wang E L, Feng L P, Yin H, Yu W D. Phenological trends of winter wheat in response to varietal and temperature changes in the North China Plain. *Field Crops Research*. 2013, 144:135-144.
- [11] Che S J, Zhi L H, Peng L H. Impact of warmer climate on main

- growing periods of winter wheat and response strategy. Chinese Journal of Agrometeorology, 2005, 26(3): 180-183.
- [12] Zhang J P, Zhao Y X, Wang C 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.
- [13] Gu Y L, Lin Y, Li Y H. The Analysis on the Effect of Temperature Fluctuation on Primary Growing Periods of Winter Wheat in Hebei, Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 12(21): 141-146.
- [14] E Y H, Huo Z G, Ma Y P, Xu Y J. The regional diversity of changes in growing duration of spring wheat and its correlation with climatic adaptation in Northern China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6295-6302.
- [15] Gao X R, Wang C Y, Zhang J Q, Xue X Z. Crop water requirement and temporal-spatial variation of drought and flood disaster during growth stages for maize in Northeast during past 50 years. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(12): 101-109.
- [16] Smith M. CROPWAT-A computer program for irrigation planning and management-Irrigation and Drainage Paper. 46. Rome: Food and Agriculture Organization of the United, 1992: 20-21.
- [17] Doll P, Siebert S. Global modeling of irrigation water requirements. Water Resources Research, 2002, 38(4): 1-8.
- [18] Li Y, Yang X G, Ye Q, Huang W H. Variation characteristics of rice water requirement in middle and lower reaches of Yangtze River during 1961-2007. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(9): 175-183.
- [19] Richard G. A, Luis S. P, Dirk R, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements-Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United, 1998: 152-223.
- [20] Brouwer C, Heibloem M. Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs, Irrigation Water Management Training Manual No. 3. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986, 63-68.
- [21] Cao H X, Li X L, Kang S Z, Wang Z C. Effect of Climate Change on Main Crop Water Requirements in Guanzhong Region. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(4): 6-9.
- [22] Zhang S Q, Deng B, Yang Y J. Change of water budget for dryland crops and its response to climate change in Sichuan province. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(10): 105-111.
- [23] Yang X, Gu Y L, Hao L S. The features of temporal-spatial precipitation change during crop growth in Hebei province. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(8): 124-129.
- [24] Zuo H C, Lu S H, Hu Y Q. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in china in the last 50 years. Plateau Meteorology, 2004, 23(2): 238-244.
- [25] Gu Y L, Lin Y, Li Y H. The analysis on the effect of temperature fluctuation on primary growing periods of winter wheat in Hebei. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(12): 141-146.
- [26] Wang B, Gu Y Q, Liu X, Luo W H, Dai J F, Zhang W, Qi C J. Analysis of the temporal and spatial changes of photo-thermal resources in winter wheat growing region in China. Scientia Agricultura sinica, 2012, 45(2): 228-238.
- [27] Yang J Y, Mei X R, Liu Q, Yan C R, He W Q, Liu E K, Liu S. Variations in winter wheat growth stages under climate changes in northern China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(6): 623-631.
- [28] Ding Y H, Shi G Y. Research on the effects of climate change and climate in China. Beijing: China Meteorological Press, 1997: 513-519.
- [29] Lin E D, Zhang H X. Modeling of Impact of Global Climate Change on the Agriculture in China. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 1997: 142.
- [30] Liu Y, Wang L, Ni G H, Cong Z T. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 6-12.
- [31] Ma L, Yang Y M, Yang Y H, Xiao D P and Bi S J. The distribution and driving factors of irrigation water requirements in the north china plain. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(2): 324-339.
- [32] Gu S X, He D M, Cui Y L, Li Y H. Variations of Agricultural Water Requirements in Lancang River Basin in Last 50 Years. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(11): 1355-1362.
- [33] Ma J H, Liu Y, Yang X G, Wang W F, Xue C Y, Zhang X Y. Characteristics of climate resources under global climate change in the North China Plain. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(14): 3818-3827.
- [34] Cao Q, Yao F M, Lin E D, Zhang J H, Wang P J, Qin P C. Analysis of Changing Characteristics of Agricultural Climate Resources in the Main Planted Areas of Winter Wheat in China over Last 50 Years. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(2): 161-166.
- [35] Gong Y, Hua J J, Gao G Q, Wang P. Analysis of Precipitation Change Trend during Key Water Requirement Periods of Winter Wheat in Hebei Plain. Water Saving Irrigation, 2009, 11: 8-11.
- [36] Liang L Q, Li L J, Zhang L, Li J Y, Jiang D J, Xu M X, Song W X. Sensitivity of the reference crop evapotranspiration in growing season in the West Songnen Plain. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 1-5.
- [37] Du J Q, Shu J M, Liu C C, Wang L X, Guo Y, Zhang L P. Variation characteristics of reference crop evapotranspiration and its responses to climate change in upstream areas of Yellow River basin. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(12): 92-100.
- [38] Liu X Y, Li Y Z, Hao W P. Trend and causes of water requirement of main crops in North China in recent 50 years. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(10): 155-159.
- [39] Liu X M, Zheng H X, Zhang M H, Liu C M. Identification of dominant climate factor for pan evaporation trend in the Tibetan Plateau. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(4): 594-608.
- [40] Zhang S Q, Deng B, Yang Y J. Change of water budget for

dryland crops and its response to climate change in Sichuan province. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(10):105-111.

- [41] Shan L, Deng X P, Su P, Zhang S Q, Huang Z B, Zhang Z B. Exploitation of crop drought resistance and water-saving potentials. Review of China Agricultural Science and Technology, 2002, 2(2):66-70.
- [42] Wang J R, Ma C X, Li B J, Zhou R B, Wang Y, Jiang Q C, Yu X F, Zhang Y. Effects of Limited Irrigation of Late Sowing Winter Wheat on Water Productivity. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(4):51-54.
- [43] Yu Z W. Water-saving and economical fertilizer cultivation theory and technology of wheat. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 2001.
- [44] Liu F, Qi X H, Zhao J P, Tian Q Z. Effect of fertilization on the water regime and physiological characteristics of photosynthesis in winter wheat under rainfed farming conditions. Acta Agronomica Sinica, 1997, 23(5):615-619.

参考文献:

- [2] 房全孝,陈雨海.冬小麦节水灌溉的生理生态基础研究进展.干旱地区农业研究,2003,21(1):21-26.
- [5] 王卫光,彭世彰,孙凤朝,邢万秋,罗玉峰,徐俊增.气候变化下长江中下游水稻灌溉需水量时空变化特征.水科学进展,2012,23(5):656-664.
- [7] 韩冰,罗玉峰,王卫光,彭世彰,缴锡云.气候变化对水稻生育期及灌溉需水量的影响.灌溉排水学报,2011,30(1):29-32.
- [11] 车少静,智利辉,冯立辉.气候变暖对石家庄冬小麦主要生育期的影响及对策.中国农业气象,2005,26(3):180-183.
- [12] 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.
- [13] 谷永利,林艳,李元华.气温变化对河北省冬小麦主要发育期的影响分析.干旱区资源与环境,2007,12(21):141-146.
- [14] 俄有浩,霍治国,马玉平,徐芸皎.中国北方春小麦生育期变化的区域差异性与气候适应性.生态学报,2013,33(19):6295-6302.
- [15] 高晓容,王春乙,张继权,薛绪掌.近50年东北玉米生育阶段需水量及早涝时空变化.农业工程学报,2012,28(12):101-109.
- [18] 李勇,杨晓光,叶清,黄晚华.1961—2007年长江中下游地区水稻需水量的变化特征.农业工程学报,2011,27(9):175-183.
- [21] 曹红霞,栗晓玲,康绍忠,王振昌.关中地区气候变化对主要作物需水量影响的研究.灌溉排水学报,2008,27(4):6-9.
- [22] 张顺谦,邓彪,杨云洁.四川旱地作物水分盈亏变化及其与气候变化的关系.农业工程学报,2012,28(10):105-111.
- [23] 杨贤,谷永利,郝立生.河北省农作物发育期降水量时空分布特征.农业工程学报,2012,26(8):124-129.
- [24] 左洪超,吕世华,胡隐樵.中国近50年气温及降水量的变化趋势分析.高原气象,2004,23(2):238-244.
- [25] 谷永利,林艳,李元华.气温变化对河北省冬小麦主要发育期的影响分析.干旱区资源与环境,2007,21(12):141-146.
- [26] 王斌,顾蕴倩,刘雪,罗卫红,戴剑锋,张巍,亓春杰.中国冬小麦种植区光热资源及其配比的时空演变特征分析.中国农业科学,2012,45(2):228-238.
- [27] 杨建莹,梅旭荣,刘勤,严昌荣,何文清,刘恩科,刘爽.气候变化背景下华北地区冬小麦生育期的变化特征.植物生态学报,2011,35(6):623-631.
- [28] 丁一汇,石广玉.中国的气候变化与气候影响的研究.北京:气象出版社,1997:513-519.
- [29] 林而达,张厚宣.全球气候变化对中国农业影响的模拟研究.北京:中国农业出版社,1997:142.
- [30] 刘钰,汪林,倪广恒,丛振涛.中国主要作物灌溉需水量空间分布特征.农业工程学报,2009,25(12):6-12.
- [31] 马林,杨艳敏,杨永辉,肖登攀,毕少杰.华北平原灌溉需水量时空分布及驱动因素.遥感学报,2011,15(2):324-339.
- [32] 顾世祥,何大明,崔远来,李远华.近50多年来澜沧江流域农业灌溉需水的时空变化.地理学报,2010,65(11):1355-1362.
- [33] 马洁华,刘园,杨晓光,王文峰,薛昌颖,张晓煜.全球气候变化背景下华北平原气候资源变化趋势.生态学报,2010,30(14):3818-3827.
- [34] 曹倩,姚凤梅,林而达,张佳华,王培娟,秦鹏程.近50年冬小麦主产区农业气候资源变化特征分析.中国农业气象,2011,32(2):161-166.
- [35] 龚宇,花家嘉,高桂芹,王璞.河北平原冬小麦需水关键期降水变化特征.节水灌溉,2009,(11):8-11.
- [36] 梁丽乔,李丽娟,张丽,李九一,姜德娟,胥铭兴,宋文献.松嫩平原西部生长季参考作物蒸散发的敏感性分析.农业工程学报,2008,24(5):1-5.
- [37] 杜加强,舒俭民,刘成程,王丽霞,郭扬,张林波.黄河上游参考作物蒸散量变化特征及其对气候变化的响应.农业工程学报,2012,28(12):92-100.
- [38] 刘晓英,李玉中,郝卫平.华北主要作物需水量近50年变化趋势及原因.农业工程学报,2005,21(10):155-159.
- [40] 张顺谦,邓彪,杨云洁.四川旱地作物水分盈亏变化及其与气候变化的关系.农业工程学报,2012,28(10):105-111.
- [41] 山仑,邓西平,苏佩,张岁岐,黄占斌,张正斌.挖掘作物抗旱节水潜力.中国农业科技导报,2000,2(2):66-70.
- [42] 王家仁,马承新,李宝玖,周荣波,王勇,姜勤冬,于孝富,张岩.晚播冬小麦限水灌溉对水分生产率的影响.灌溉排水学报,2008,27(4):51-54.
- [43] 于振文.小麦节水节肥高产栽培理论与技术.北京:中国农业出版社,2001.
- [44] 刘芳,亓新华,赵吉平,田奇卓.施肥对旱作冬小麦植株水分变化与光合生理特性的影响.作物学报,1997,23(5):615-619.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34 ,No.9 May ,2014(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research progress on ecosystem complexity-stability relationships based on soil food web CHEN Yunfeng, TANG Zheng, LI Hui, et al (2173)
- The ecological restoration effort of degraded estuarine wetland in Northwest Yunnan Plateau, China FU Wenchao, TIAN Kun, XIAO Derong, et al (2187)
- The correlations among arable land, settlement and karst rocky desertification-cases study based on typical peak-cluster depression ... LI Yangbing, LUO Guangjie, BAI Xiaoyong, et al (2195)
- Correlation between the distribution characteristics of poisonous plants and *Ochotona curzoniae*, *Myospalax baileyi* in the East of Tibetan Plateau Alpine meadow ecosystem JIN Liang, SUN Li, CUI Huijun, et al (2208)
- Effects of the surrounding habitat on the spider community and leafhopper population in tea plantations LI Jianlong, TANG Jingchi, LI Xiudi, et al (2216)

Autecology & Fundamentals

- Effect of soil-litter layer enzyme activities on litter decomposition in *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reservoir Area GE Xiaogai, XIAO Wenfa, ZENG Lixiong, et al (2228)
- Kinetics of nutrient uptake by three emergent plants, *Phragmites australis*, *Typha orientalis* and *Scirpus triquetra* ZHANG Xiling, WANG Lixin, LIU Huamin, et al (2238)
- Effects of desertification intensity and stand age on leaf and soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Pinus elliottii* plantation HU Qiwei, NIE Lanqin, ZHENG Yanming, et al (2246)
- Effects of shrub (*Caragana microphalla* Lam.) encroachment on water redistribution and utilization in the typical steppe of Inner Mongolia PENG Haiying, LI Xiaoyan, TONG Shaoyu (2256)
- Effects of shadowing on methane Emissions from *Castanopsis carlesii* and *Cunninghamia lanceolata* CHEN Xixiang, YANG Yanhua, JIANG Jun, et al (2266)
- Oviposition preference and offspring performance of the oriental fruit fly *Bactrocera dorsalis* and guava fruit fly *B. correcta* (Diptera: Tephritidae) on six host fruits LIU Hui, HOU Bohua, ZHANG Can, et al (2274)
- Pollination Mechanisms of genus *Salvia* (Lamiaceae) in East Asia (China) HUANG Yanbo, WEI Yukun, GE Binjie, et al (2282)

Population, Community and Ecosystem

- The effect of resource pulse supply on interspecific competition of a few algal species LI Wei (2290)
- Soil fertility quality assessment under different vegetation restoration patterns LI Jingpeng, XU Mingfeng, SU Zhiyao, et al (2297)
- Scale change and dependence of plant functional traits in hilly areas of the loess region, Shaanxi Province, China DING Man, WEN Zhongming, ZHENG Ying (2308)
- N and P stoichiometry of *Koeleria paniculata* leaf and soil in Xiangtan Manganese Mine wasteland XU Luyan, TIAN Dalun, WANG Guangjun, et al (2316)
- Evapotranspiration and factors influencing evapotranspiration in the spring wheat farmland of China's Loess Plateau YANG Fulin, ZHANG Qiang, WANG Wenyu, et al (2323)
- Isolation and Biolog identification of the high-efficiency azotobacter from iron tailing under different vegetation restoration modes LI Wen, YAN Aihua, HUANG Qiuxian, et al (2329)
- Assessing effects of *Cupressus chengiana* plantations in the dry valley of Zagunao River, Li county of Sichuan Province LI Dongsheng, LUO Da, SHI Zuomin, et al (2338)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Landscape diversity of *Paerargyrops edita* Tanaka stock in Minnan-Taiwan Bank Fishing Ground CAI Jiandi, SU Guoqiang, MA Chao, et al (2347)
- Landscape classification in a small area for soil series survey and mapping: a case study in the Ningzhen hills, China LU Haodong, PAN Jianjun, FU Chuancheng, et al (2356)
- Impacts of climate change on winter wheat growing period and irrigation water requirements in the north china plain HU Wei, YAN Changrong, LI Yingchun, et al (2367)

Resource and Industrial Ecology

- Factor decomposition of carbon intensity in Xiamen City based on LMDI method LIU Yuan, LI Xiangyang, LIN Jianyi, et al (2378)
- Evaluation index system of sustainable livelihoods ecotourism strategy: a case study of wangjiazhai community in baiyangdian wetland nature reserve, Hebei WANG Jin, ZHANG Yujun, SHI Ling (2388)
- Relationships between stem sap flow rate of litchi trees and meteorological parameters FAN Chao, QIU Yanping, LI Zhiqiang, et al (2401)
- Evaluation on control efficiency of bethylid parasitoids on pest insects indoor: a case of *Sclerodermus* sp. (Hymenoptera: Bethyridae) ZHAN Maokui, YANG Zhongqi, WANG Xiaoyi, et al (2411)

Urban, Rural and Social Ecology

- The dynamic change of herdsmen well-being and ecosystem services in grassland of Inner Mongolia: take Xilinguole League as example DAI Guangshuo, NA Risu, DONG Xiaobin, et al (2422)
- The construction of the eco-agricultural yards in three gorges reservoir area based on agricultural non-point source pollution zones LIU Juan, XIE Qian, NI Jiupai, et al (2431)
- Spatial pattern gradient analysis of a transect in a hilly urban area in China from the perspective of transportation corridor sprawl LÜ Zhiqiang, DAI Fuqiang, ZHOU Qigang (2442)

《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 于贵瑞

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 9 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 9 (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