

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 22 期 Vol.33 No.22 **2013**

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 33 卷 第 22 期 2013 年 11 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 利用分布有/无数据预测物种空间分布的研究方法综述 刘芳,李晟,李迪强 (7047)
- 景观服务研究进展 刘文平,宇振荣 (7058)
- 土壤呼吸组分分离技术研究进展 陈敏鹏,夏旭,李银坤,等 (7067)

个体与基础生态

- 平茬高度对四合木生长及生理特性的影响 王震,张利文,虞毅,等 (7078)
- 不同水分梯度下珍稀植物四数木的光合特性及对变化光强的响应 邓云,陈辉,杨小飞,等 (7088)
- 水稻主茎节位分蘖及生产力补偿能力 隗溟,李冬霞 (7098)
- 基于辐热积法模拟烤烟叶面积与烟叶干物质产量 张明达,李蒙,胡雪琼,等 (7108)
- 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响 田慎重,王瑜,李娜,等 (7116)
- 不同光照强度下兴安落叶松对舞毒蛾幼虫生长发育及防御酶的影响 鲁艺芳,严俊鑫,李霜雯,等 (7125)
- 南方小花蝽在不同空间及笼罩条件下对西花蓟马的控制作用 莫利锋,鄧军锐,田甜 (7132)
- 浮游植物对溶解态 AI 的清除作用实验研究 王召伟,任景玲,闫丽,等 (7140)
- 卧龙巴郎山川滇高山栎群落植物叶特性海拔梯度特征 刘兴良,何飞,樊华,等 (7148)
- 春夏季闽江口和兴化湾虾类数量特征 徐兆礼,孙岳 (7157)
- 啃食性端足类强壮藻钩虾对筲箕湖三种大型海藻的摄食选择性 郑新庆,黄凌风,李元超,等 (7166)

种群、群落和生态系统

- 4 种农业措施对三化螟种群动态的控制作用 张振飞,黄炳超,肖汉祥,等 (7173)
- 黄土高原沟壑区森林带不同植物群落土壤氮素含量及其转化 邢肖毅,黄懿梅,安韶山,等 (7181)
- 基于诊断学的生态系统健康评价 蔡霞,徐颂军,陈善浩,等 (7190)
- 稻田生态系统中植硅体的产生与积累——以嘉兴稻田为例 李自民,宋照亮,姜培坤 (7197)
- 自由搜索算法的投影寻踪模型在湿地芦苇调查中的应用 李新虎,赵成义 (7204)
- 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性 刘秉儒,张秀珍,胡天华,等 (7211)
- 内蒙古典型草原灌丛化对生物量和生物多样性的影响 彭海英,李小雁,童绍玉 (7221)
- 黄土丘陵沟壑区 80 种植物繁殖体形态特征及其物种分布 王东丽,张小彦,焦菊英,等 (7230)
- 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价 刘振生,高惠,滕丽微,等 (7243)
- 太湖湖岸带浮游植物初级生产力特征及影响因素 蔡琳琳,朱广伟,李向阳 (7250)

景观、区域和全球生态

- 艾比湖地区土壤呼吸对季节性冻土厚度变化的响应…………… 秦 璐,吕光辉,何学敏,等 (7259)
- 田间条件下黑垆土基础呼吸的季节和年际变化特征…………… 张彦军,郭胜利,刘庆芳,等 (7270)

资源与产业生态

- 光核桃遗传资源的经济价值评估与保护 …………… 张丽荣,孟 锐,路国彬 (7277)
- 棉花节水灌溉气象等级指标…………… 肖晶晶,霍治国,姚益平,等 (7288)

研究简报

- 云南红豆杉人工林萌枝特性…………… 苏 磊,苏建荣,刘万德,等 (7300)
- 赣中亚热带森林转换对土壤氮素矿化及有效性的影响…………… 宋庆妮,杨清培,余定坤,等 (7309)

学术信息与动态

- 2013 年 European Geosciences Union 国际会议述评 …………… 钟莉娜,赵文武 (7319)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 276 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2013-11



封面图说: 山坡岩羊图——岩羊属国家二级保护动物,因喜攀登岩峰而得名,又名石羊。贺兰山岩羊主要分布于海拔 1500—2300m 的山势陡峭地带,羊群多以 2—10 只小群为主。生境适宜区主要为贺兰山东坡(宁夏贺兰山国家级自然保护区)的西南部,而贺兰山西坡(内蒙古贺兰山国家级自然保护区)也有少量分布。贺兰山建立国家级自然保护区以来,随着保护区环境的不断改善,这里岩羊的数量也开始急剧增长,每平方公里的分布数量现居世界之首,岩羊的活动范围也相应扩大到低山 900 米处的河谷。贺兰山岩羊生境选择的主要影响因子为海拔、坡度及植被。

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/stxb201207301080

肖晶晶, 霍治国, 姚益平, 张蕾, 李娜, 柏秦凤, 温泉沛. 棉花节水灌溉气象等级指标. 生态学报, 2013, 33(22): 7288-7299.

Xiao J J, Huo Z G, Yao Y P, Zhang L, Li N, Bai Q F, Wen Q P. Meteorological grading indexes of water-saving irrigation for cotton. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(22): 7288-7299.

棉花节水灌溉气象等级指标

肖晶晶^{1,2}, 霍治国^{1,*}, 姚益平², 张蕾¹, 李娜³, 柏秦凤⁴, 温泉沛⁵

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 浙江省气候中心, 杭州 310017;

3. 山西省气象决策服务中心, 太原 030006; 4. 陕西省经济作物气象服务台, 西安 710000;

5. 武汉区域气候中心, 武汉 430074)

摘要:干旱是我国棉区主要的气象灾害, 构建棉花不同发育期节水灌溉气象等级指标对于优化农田灌溉、指导农业生产具有十分重要的现实意义。论文基于农田水分平衡原理, 利用全国 347 个地面气象观测站 1961—2008 年逐日气象资料, 89 个农业气象观测站 1993—2008 年(其中 26 个站为 1980—2008 年)逐旬土壤相对湿度、灌溉量、逐年作物产量等资料, 结合 FAO-1979 作物产量-水分关系函数, 针对全国棉区播种-现蕾、现蕾-开花、开花-吐絮和全生育期的水分亏缺率、水分亏缺量与减产率之间的关系, 构建棉花不同发育期和全生育期节水灌溉气象等级指标。除发育时段不同外, 其他在研究站点选择、因素选取等方面完全一致。结果表明: 棉花全生育期节水灌溉气象 I—III 级水分亏缺率(D)和水分亏缺量(辅助指标)指标分别为 $15\% \leq D < 30\%$ 、 $30\% \leq D < 45\%$ 、 $\geq 45\%$ 和 1—2 水(灌溉次数 1—2 次)、2—4 水(灌溉次数 2—4 次)、 ≥ 4 水(灌溉次数大于 4 次); 播种-现蕾为 $20\% \leq D < 40\%$ 、 $40\% \leq D < 50\%$ 、 $\geq 50\%$ 和 0.5 水、1 水、 > 1 水; 现蕾-开花为 $20\% \leq D < 35\%$ 、 $35\% \leq D < 45\%$ 、 $\geq 45\%$ 和 0.5 水、1 水、 > 1 水; 开花-吐絮为 $20\% \leq D < 35\%$ 、 $35\% \leq D < 50\%$ 、 $\geq 50\%$ 和 1 水、1—2 水、 > 2 水。

关键词:棉花; 节水灌溉; 气象指标

Meteorological grading indexes of water-saving irrigation for cotton

XIAO Jingjing^{1,2}, HUO Zhiguo^{1,*}, YAO Yiping², ZHANG Lei¹, LI Na³, BAI Qinfeng⁴, WEN Quanpei⁵

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2 Zhejiang Climate Center, Hangzhou 310017, China

3 Shanxi Meteorological Service Center for Decision Making, Taiyuan 030006, China

4 Shanxi Meteorological Service Observatory for Economic Crops, Xi'an 710000, China

5 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074, China

Abstract: Cotton is an important economic crop and ranks first among economic crops in planting area in China. There are five cotton areas which are located at South China, North China, Yangtze River basin, Yellow River basin and North-West arid regions of China. The water requirement of the whole growth stage of cotton is different in different area, which is specified as 400mm to 1000mm or more. Drought is the key factor that hinders the yield and quality of cotton in the North and North-West of China. Also the frequency of drought in different growth stages is high in some regions because of the temporal mismatch between precipitation and water-consumption of cotton and local people have to irrigate in arid years. It is believed that conventional irrigation is a luxury use of water and can be reduced without much effect on economic yield. Methods that may cut down irrigation are of considerable interest and should be explored.

To optimize irrigation and provide a technical guide on agricultural production, the water-saving irrigation

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划课题资助项目(2011BAD32B02); 国家标准课题资助项目(20083113-T-416)

收稿日期:2012-07-30; **修订日期:**2013-03-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huozhigg@cams.cma.gov.cn

meteorological grading indexes in different growth stages of cotton are built in this paper, based on the farmland water balance principle, the theory of insufficient irrigation and regulated deficit irrigation. Multidimensional information including daily meteorological data from 347 meteorological stations from 1961 to 2008, soil moisture data every ten-day from 89 agro-meteorological stations from 1993 to 2008 (in which 26 agro-meteorological stations from 1980 to 2008), irrigation amount and yield data are collected to analyze the relationship between the moisture deficiency rates, the quantity of water deficit and yield reduction rates of sowing -jointing stage, jointing -heading, heading-mature period and the whole growth stage of cotton referring to the product-water function (FAO-1979). Results indicate that water-saving irrigation meteorological grading indexes from I — III level of moisture deficiency rate(D) are respectively for $15\% \leq D < 30\%$, $30\% \leq D < 45\%$ and $\geq 45\%$, corresponding to 1—2 irrigations ($600\text{m}^3/\text{hm}^2$ each time), 3—4 irrigations and ≥ 4 irrigations for the quantity of water deficit (secondary indicators) for the whole growth stage of cotton. For sowing-budding stage, the indicators are respectively for $20\% \leq D < 35\%$, $35\% \leq D < 50\%$ and $\geq 50\%$, corresponding to 0.5 irrigation, 1 irrigations and > 1 irrigations. For budding-flowering stage, the indicators are respectively for $20\% \leq D < 35\%$, $35\% \leq D < 45\%$ and $\geq 45\%$, corresponding to 1 irrigation, 1—2 irrigation and > 2 irrigation. For flowering-harvesting stage, the indicators are respectively for $20\% \leq D < 35\%$, $35\% \leq D < 50\%$ and $\geq 50\%$, corresponding to 1 irrigation, 1—2 irrigation and > 2 irrigations.

The index system set up in the paper is elaborated for the first time as a drought monitoring index to explore its applicability in different development stages of cotton. Besides that the drought warning and forecasting is developed by considering the weather forecast and water consumption of crops which is calculated by referring the FAO-56 function. the conclusions are based on the current level of production and management, natural water supplies and artificial irrigation. In this paper, we introduce the product-water function as the theoretical basis and use multisource data to prove these conclusions. However, there are some limitations. Firstly, we use the referring value of FAO-56 to represent the crop-coefficient approximately. Secondly, we use the precipitation index to replace the effective precipitation, ignoring the precipitation type. Thirdly, we use trend yield under drought year to express approximately the maximum yield by referring the FAO-1979 function. Actual irrigation capacity and detailed indexes should be considered in further studies.

Key Words: cotton; water-saving irrigation; meteorological indexes

节水农业因具有显著的节水、保质、稳产效应而成为缓解我国水资源日趋紧张状况、促进国民经济稳定发展的重大战略措施,同时也是建设现代农业的需求,成为未来农业发展的方向^[1]。节水灌溉是实施节水农业的主体,其关键问题为如何提高水分利用率,即探寻适宜时间、适宜灌水量的节水灌溉指标问题。近 30 年的节水灌溉理论研究认为作物具有一定“补偿效应”或超补偿效应,在干旱条件下作物通过调节同化物再分配、气孔开度和根冠比来趋利避害^[2-4],以非充分灌溉、调亏灌溉、控制性交替灌溉和局部灌溉技术为代表^[4-7];其指标构建以土壤-植物-大气连续体 (Soil-Plant-Atmosphere Continuum, 简称 SPAC) 中的水分运移机理为基础,主要包括土壤水分指标、植物生理指标、综合效应评价指标等^[8-10]。然而,现有的节水灌溉指标主要针对作物全生育期开展,一般通过田间试验得到,局地性较强^[11-12]。研究表明,不同时期、不同程度的水分亏缺对作物生理影响程度不同,不同水分处理下的增产效果也不相同^[13-14]。该类指标不仅应用推广难度较大,且难以与实时降水监测、未来降水预报进行耦合集成应用。因此,分发育期构建普适的作物节水灌溉指标成为农业节水研究热点。

棉花是重要的工业原料,其种植面积居我国经济作物之首。近年来我国棉区北迁西移,长江流域棉区和华南棉区种植面积大幅减少,黄河流域棉区和西北内陆棉区占全国棉花种植面积的 70% 以上^[15]。华北和西北为我国重旱区,西北内陆地区干旱尤为严重,棉花水分亏缺量达 400—500mm^[16],基本为灌溉农业。其他棉区由于降水与作物耗水时空不匹配,干旱时有发生,如长江中下游的夏季伏旱成为该棉区减产的主要因素之

一。20 世纪 90 年代以来,干旱发生的频率、强度都有增大的趋势^[17],1992、2001 年我国华北、西南棉花分别因旱减产 27.6%和 19.9%^[18]。随着水资源日益紧缺和工农业用水矛盾加剧,水资源紧缺问题日益凸显。同时,由于灌溉时间、灌溉量不当,目前我国农田灌溉水利用率系数仅为 0.5,远不及发达国家的 0.7—0.8^[19]。因此构建棉花节水灌溉气象等级指标,对于节约农业用水、提高农田水分利用率,实现农业稳产、高产、可持续发展具有积极意义。研究棉花分发育期的节水灌溉气象等级指标,可为通过对棉花不同发育阶段的需水规律及其当前时段作物水分亏缺率、亏缺量等的实时分析,结合未来 3d 的降水定量预报,进行区域节水灌溉气象等级预报,开展实时、有针对性地棉花节水灌溉气象服务提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

气象资料、土壤湿度资料和作物发育期资料取自国家气象信息中心,气象资料包括 347 个站点 1961—2008 年逐日的气压(hPa)、降水量(mm)、最高温度(℃)、最低温度(℃)、水汽压(hPa)、风速(m/s)、日照时数(h)等,个别资料缺失值采用多年平均值代替。土壤湿度资料为 89 个农业气象观测站 1993—2008 年(其中 26 个站为 1980—2008 年)的逐旬土壤相对湿度、土壤水分常数等。作物发育期资料取自各地农业气象观测站,产量资料来自各地的统计年鉴。

1.2 研究方法

论文立足当前棉花大田生产水平和农田管理水平,基于农田水分平衡原理和节水灌溉理论,依据节水灌溉基本原则^[20],结合棉花不同发育阶段的需水规律和水分敏感系数^[21-22],耦合地面气象观测、农业气象观测、作物产量等多元信息资料,分析气象条件对棉花不同发育阶段水分亏缺率及其对减产率影响的量化关系,筛选导致棉花不同减产程度的水分亏缺临界指标、变化范围,构建棉花节水灌溉气象等级指标。

1.2.1 棉花需水量

作物生育期需水量是指在正常生育状况和最佳水、肥水平下,作物完成正常生长发育,获得高产时的植株蒸散、棵间蒸发以及构成植株体的水分之和。由于构成植株体的水量和棵间蒸发量很小,实际计算时取作物需水量在数量上等同于高产水平下的植株蒸腾量和棵间蒸发量之和,计算公式为:

$$E_i = \sum_{i=1}^n k_i \times ETO_i \quad (1)$$

式中, E_i 为棉花逐日需水量(mm); k_i 为对应作物系数; ETO_i 为逐日可能作物蒸散量(mm),采用 FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 公式求得,具体计算过程见文献^[23]; n 为棉花全生育期总日数。取 FAO-56 推荐系数值如表 1^[24]。

表 1 棉花发育期作物系数(FAO-56)

Table 1 Crop coefficient of different developmental stages of cotton(FAO-56)

	季初 The first development stage	发育 The vegetative stage	季中 The mid- development stage	季末 The end development stage	收获 The harvest stage	全生育期 The whole development stage
棉花	0.4—0.5	0.7—0.8	1.05—1.25	0.8—0.9	0.65—0.7	0.8—0.9

季初阶段为从发芽到覆盖 10%的土地;作物发育阶段为从覆盖土地 10%到覆盖土地 80%;季中阶段为从覆盖土地 80%到开始成熟;季末阶段持为从开始成熟到收获

1.2.2 农田自然供水量

农田自然供水量(W)包括土壤有效底墒量、有效降水量和地下水供给量,计算公式为:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \quad (2)$$

式中, W_1 为土壤有效底墒量(mm); W_2 为有效降水量(mm); W_3 为地下水供给量(mm)。土壤有效底墒指作物根系层内在凋萎湿度以上的土壤水,计算公式为:

$$W_e = 0.1h \cdot \rho \cdot (r - r_w) \quad (3)$$

式中, W_e 为土壤有效底墒 (mm); 0.1 为单位换算系数; h 为土层深度 (cm); ρ 为土壤容重 (g/cm^3); r 为土壤湿度, r_w 为凋萎湿度, 二者均用土壤湿度重量百分率表示, 取其分子。有效降水计算公式为:

$$W = P - V - Q - F \quad (4)$$

式中, P 为实际降水量 (mm); V 为作物截留量 (mm); Q 为径流量 (mm); F 为深层渗透量 (mm)。由于棉花根系较深, 生育期较长, 本文取降水量即为有效降水量。在干旱年份, 地下水一般不能为作物所用或者利用量极少, 在本文不作考虑。

1.2.3 农田灌溉量

农田灌溉量指单位时间灌溉到农田的实际水量。单位时间累积灌溉量为全部灌溉量之和:

$$G_L = \sum_{k=1}^t G_k \times 0.1 \quad (5)$$

式中, G_L 为累积灌溉量 (mm); G_k 为第 k 次的灌溉量 (m^3/hm^2); t 为灌溉总次数; 0.1 为单位换算系数; 如灌溉量单位为 $\text{m}^3/666.7\text{m}^2$, 则单位换算系数为 1.5。灌溉次数及其灌溉量可根据实际生产中的具体情况确定, 一次灌溉量可采用等量或不等量。

1.2.4 发育期水分盈亏率/量

发育期的水分盈亏率/率是表征作物某发育期的水分盈亏状况, 计算公式如下:

$$Dz_j = W_{01} + \sum_{j=1}^m P_j - \sum_{j=1}^m E_j \quad (6)$$

$$D_j = (W_{01} + \sum_{j=1}^m P_j - \sum_{j=1}^m E_j) / \sum_{j=1}^m E_j \times 100\% \quad (7)$$

式中, D_z/D 为作物某发育期的农田水分盈亏率/率 ($\text{mm}/\%$)。当 $D_z/D > 0$ 时, 农田水分盈余, 称为农田水分盈余量/率; 当 $D_z/D < 0$ 时, 农田水分亏缺, 称为农田水分亏缺量/率。 W_{01} 为时段始第 1 天的土壤有效底墒量 (mm)。 P 为时段内的日降水量 (mm)。 E 为时段内的作物日需水量 (mm)。 j 为时段日数序号, $j=1, 2, \dots, m$, m 为时段日数。

1.3 产量分解模型

作物最终产量的形成受多种因子影响, 因子间的相关机制也很复杂, 综合起来, 可以把这些因子可以分为气象因子、农技措施和随机“噪音”三大类^[25], 分别对应气象产量、趋势产量和噪音产量。其一般通式为:

$$y = y_t + y_w + \Delta y \quad (10)$$

式中, y 为作物实际产量; y_t 为趋势产量, y_w 为气象产量; Δy “噪音”项所占比例很小, 不予考虑。因此 (10) 式或简化为:

$$y = y_t + y_w \quad (11)$$

趋势产量采用滑动平均模拟方法得到, 定义当年棉花实际产量低于对应年趋势产量的百分率为当年棉花的减产率, 计算公式为:

$$x = \frac{y_w}{y_t} \times 100\% = \frac{y - y_t}{y_t} \times 100\% \quad (12)$$

1.4 水分亏缺率与减产率理论关系式的引入

水分亏缺率是指作物某生育期内水分供给量低于其理论需水量的百分比, 表明作物全生育期内水分的亏缺程度。减产率是指作物实际产量与作物理论产量的差与理论产量的比值。FAO-1979 年提出作物产量与水分应该有如下关系^[26]:

$$(1 - y/y_{\max}) = k(1 - W/W_{\max}) \quad (13)$$

式中, $y_{\max}$ 为棉花实际产量为最高产量, 实际产量不仅受到气象因子的影响, 还受到其他因子的影响, 本文取值为棉花的趋势产量; W 为生育期内实际水分供给量; $W_{\max}$ 为棉花的理论需水量。 k 为产量反应系数, 本文取值为 0.85^[27]。因此上式可以变化为:

$$\frac{y_{\max} - y}{y_{\max}} = 0.85 \times \frac{W_{\max} - W}{W_{\max}} \quad (14)$$

式(14)左边为减产率,右边为水分缺水率与 0.85 的乘积,理论上一定范围内可以认为二者近似存在上式关系。

1.5 样本站点选择

选取研究站点时遵循以下几点原则:①选取发生干旱、减产的年份,且减产率不少于 3%^[28];②选取灌溉能力有限的区域。灌溉能力强的区域,作物减产往往是由于病虫害、田间管理、其他气象灾害等多方面因素造成,干旱不是主要的减产因素;③选取灌溉能力强、干旱严重、有灌溉记录的地区年份进行指标验证。

2 结果与分析

将各地区的气象资料、土壤水分资料和产量资料代入(1)~(14)式,可以得到不同水分亏缺率下对应的减产率。按照自然灾害等级划分方法^[29],以减产率 5%、10%和 20%为界限点分析减产率与水分亏缺率、水分亏缺量的对应关系,构建棉花节水灌溉气象等级指标。

囿于篇幅,论文以棉花全生育期的指标构建为例,给出棉花节水灌溉气象等级指标的构建方法和验证情况。其他发育期节水灌溉气象等级指标构建方法及验证与此方法相同。

2.1 棉花全生育期节水灌溉气象等级指标的构建

2.1.1 棉花水分亏缺率等级指标

基于全国棉花产区逐站、逐年的水分亏缺率、减产率计算结果,筛选由于干旱导致棉花减产且灌溉能力有限的站点和年份,表 2 按照不同减产率等级给出了不同站点、不同年份棉花全生育期水分亏缺率与减产率的对应情况。

表 2 棉花全生育期水分亏缺率与减产率的对应关系

Table 2 The relationship between the moisture deficiency rates and yield reduction rates of the whole growth stage of cotton

减产率/% Rang of yield reduction	地区 Distinct	年份 Year	亏缺率/% Moisture deficiency rates	减产率/% Yield reduction rates	地区	年份	亏缺率/%	减产率/%
>20	清河	1997	62.50	48.53	枣阳	1999	45.21	31.64
	尧都	2001	55.08	32.50	景县	1997	51.31	37.93
	巴里坤	1999	48.37	20.26	咸阳	1996	39.71	27.20
10—20	尧都	1997	48.51	19.29	盐山	1993	27.10	13.27
	兖州	2002	39.95	14.42	安岳	2006	34.21	18.46
	南漳	1999	35.56	11.32	渭南	2000	32.23	10.77
	夏县	1993	37.40	11.35	尧都	2000	37.70	11.35
	巴里坤	1998	40.15	16.63				
5—10	韩城	1999	35.19	7.00	清河	1994	28.11	8.10
	尧都	1994	31.73	5.46	渭南	1996	20.86	5.29
	临县	2000	31.46	6.10	清河	1996	12.47	9.58
	韩城	1996	29.87	5.30	平遥	1995	36.06	8.03
	枣阳	1992	37.14	9.59				

Jensen 模型研究表明,棉花前期产量-水分敏感指数较小,上升缓慢,且发育期复水后对补偿效应显著,因此一定程度的干旱并不直接影响作物籽粒形成;后期进入营养生长期和生殖生长期,产量-水分敏感指数上升较快,且复水补偿效应较小,因此随着干旱加剧,减产明显^[30]。由表 2 可以看出,减产率>20%、10%—20%和 5%—10%对应样本水分亏缺率(D)的平均值分别为 50.36%、38.76%和 29.31%。将表 2 用图形表示(图略),

可以看出样本点的减产率与水分亏缺呈现出明显的直线关系($R^2 = 0.75$),与前人研究成果相符^[31]。亏缺灌溉试验表明,85%亏缺情况下,棉花产量与常年持平(产量波动在 $\pm 5\%$ 以内),即水分亏缺超过15%时可能出现减产(产量波动超过5%);亏缺70%、55%处理下呈现的旱情随发育期变化,在需水关键期出现明显的中旱和重旱^[31]。表2中落在 $D \geq 45\%$ 、30%—45%和15%—30%区间内的样本分别占3个减产率区间内所有样本的83.33%、77.78%和33.33%,落在对应 D 区间 $\pm 2.5\%$ 所占比率分别达83.33%、88.89%、66.67%(表3),96.00%的样本 $D \geq 15\%$ 时减产率 $\geq 5\%$,与亏缺灌溉试验结论相符。表明在实际生产中棉花全生育期水分亏缺率 $\geq 15\%$ 可以作为棉花减产的临界指标。

表3 棉花全生育期水分亏缺率等级指标的回代验证情况

Table 3 The validation of moisture deficiency rates' grading indexes of the whole growth stage of cotton

水分亏缺率 $D/\%$ Moisture deficiency rates	减产率/% Yield reduction rates	验证样本 Sampling				
		D 区间		D 区间 The rang of D		
		吻合率/% Accuracy of the rang of D	D 区间 ± 2.5 吻合率/% Correcting percent of the rang of D	平均值/% Mean	最小值/% Min	最大值/% Max
$15 \leq D < 30$	5—10	33.33	66.67	29.31	12.47	37.14
$30 \leq D < 45$	10—20	77.78	88.89	36.98	48.51	27.1
$D \geq 45$	≥ 20	83.33	83.33	50.36	39.71	62.5

按表3给出的棉花水分亏缺率等级区间,对全部站点、区间站点分别计算不同等级区间的水分亏缺率、减产率平均值,并进行直线拟合;比较拟合直线与0.85理论线的平行关系,全部站点、区间站点的拟合直线斜率分别为1.1和0.92,区间站点较全部站点更与理论值接近,但有一定的偏差,这可能是棉花品种抗旱性提高有关。综上,可将指标的阈值分别设定于15%、30%和45%。

2.1.2 水分亏缺量等级指标

棉花耗水较多,耗水系数一般为1300—2000,且随着产量的提高而降低^[32]。不同发育期缺水敏感系数不同,水分亏缺对作物生长发育与产量的影响不同。产量-水分函数研究表明作物产量与耗水量呈现出较好的曲线函数关系,即一定程度的水分亏缺量对产量影响并不明显^[27,30]。试验表明干旱状态下,一定范围内随着供水量的增加,棉花产量与耗水量呈现出较好的线性关系,但当供水超过一定限度时,增产不明显,甚至减产^[31,33]。

由于灌溉定额与当地的土壤类型、水文情况等密切相关,棉花在各地的灌溉制度差异较大。以新疆为例,吐鲁番地区一次灌水120mm;阿克苏地区一次灌水80—250mm(新疆农气观测报表)。考虑到棉花种植区的灌溉特征,且既得资料大部分只记录灌溉次数,因此本文采用灌水次数来反映其水分亏缺等级,如图1。图1中4水下(27个样本)对应未灌溉的 D 平均值、最大值和最小值为65.78%、84.94%和48.88%,灌溉后减产率平均值、最大、最小值分别为0.29%、27.20%和-27.21%,其中9.52%的样本减产率超过10%,74.07%的样本减产率 $< 5\%$,增产超过5%的样本占28.57%;5水下(20个样本)对应未灌溉的 D 平均值、最大值和最小值为70.46%、82.33%和45.52%,灌溉后减产率平均值、最大、最小值分别为3.82%、16.63%和-4.92%,其中

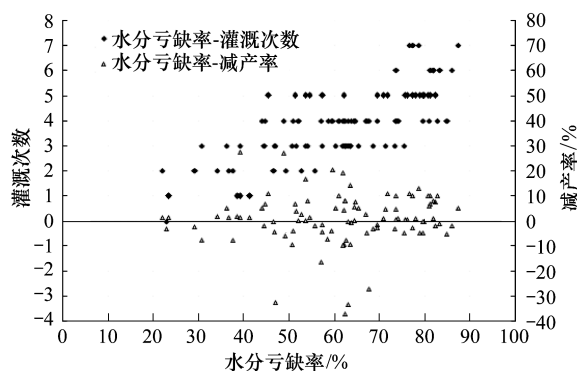


图1 棉花生育期水分亏缺率、灌溉次数/减产率对应关系

Fig.1 The relationship of the moisture deficiency rates with irrigation times, and product deficiency rates of cotton's whole growth stage

15%的样本减产率超过 10%,55%的样本减产率<5%,没有增产超过 5%的样本;综上表明 5 水并不比 4 水增产明显,即出现了多灌的情况。≥2 水时,除一个年份点水分亏缺率小于 30%以外,其他年份点水分亏缺率均大于 30%。因此将 2 水和 4 水定为指标阈值,即棉花全生育期水分亏缺量节水灌溉气象等级指标为 1—2 水、2—4 水和≥4 水。图 1 中 1—2 水、2—4 水和>4 水未灌溉时水分亏缺率(*D*)平均值分别为 37.81%、60.96%和 73.92%(表 4)。根据上文分析结果,1—2 水、2—4 水时 *D* 平均值分别为Ⅱ、Ⅲ级标准,灌溉不合理造成减产超过 5%的比例占 14.29%和 32.07%,具体如表 4。

表 4 棉花生育期灌溉次数与水分亏缺率、产量的统计分析

Table 4 The Statistical Analysis of the moisture deficiency rates, irrigation times, and product deficiency rates of cotton's whole growth stage

灌溉次数 Irrigation times	样本总量 Number of sampling	水分亏缺率/% Moisture deficiency rates			产量变化 Changes of yield		
		平均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	增产<-5% Increasing rates of yield less than 5%	平产±5% Increasing rates of yield±5%	减产>5% Reduction rates of yield more than 5%
1—2	14	37.81	21.95	55.69	7.14	78.57	14.29
2—4	53	60.96	30.77	84.94	24.53	43.40	32.07
>4	30	73.92	45.52	87.44	—	53.33	46.67

2.1.3 基于实际灌溉的间接验证

为了验证上文得到指标的可行性,选取灌溉条件好、有灌溉记载的地区的独立样本,通过计算无灌溉时的棉花生育期水分亏缺率和水分亏缺量、统计对应年份的实际灌溉量与减产率样本(表 5,图 2),进行实际生产验证。

表 5 棉花全生育期水分亏缺率/量与实际灌溉量、减产率的验证样本

Table 5 The validation of the whole growth stage of cotton of the moisture deficiency rates / the quantity of water deficit, irrigation and yield reduction rates

站名 Station name	年份 Year	亏缺量/mm Quantity of water deficit	亏缺率/% Moisture deficiency rates	灌溉量/mm Irrigation quantity	灌溉次数 Irrigation times	减产率/% Yield reduction rates
阿克苏	1997	633.50	69.46	480	4	-2.69
阿克苏	1998	562.93	67.24	560	4	-4.92
阿克苏	1999	585.61	65.40	560	3	5.04
阿克苏	2002	586.50	68.60	505	3	-3.23
阿克苏	2007	703.30	76.08	1020	5	0.46
和田	1997	784.00	81.91	750※	6	1.06
和田	1998	703.93	78.91	625	5	-4.92
和田	1999	738.00	79.60	625※	5	-0.11
和田	2000	729.40	85.96	750※	6	-1.95
和田	2001	777.18	81.33	450	6	9.99
莎车	2001	599.41	71.26	320	3	4.84
尉犁	1997	558.87	77.92	625※	5	1.06
尉犁	1998	610.08	79.54	600※	4	-4.92
尉犁	2001	621.78	73.69	750※	6	9.99
温泉	1993	306.36	51.59	375※	3	4.03
温泉	1994	422.22	63.77	500※	4	-0.53
温泉	1995	398.13	62.23	500※	4	-9.44
温泉	1996	395.75	62.38	375※	3	8.01
温泉	1999	285.31	46.63	250※	2	-0.11
温泉	1997	565.32	74.19	500※	4	1.06
博尔塔拉	1995	424.78	63.47	300	3	-9.44
博尔塔拉	1996	395.64	62.36	400	4	8.01

续表						
站名 Station name	年份 Year	亏缺量/mm Quantity of water deficit	亏缺率/% Moisture deficiency rates	灌溉量/mm Irrigation quantity	灌溉次数 Irrigation times	减产率/% Yield reduction rates
吐鲁番	1983	886.50	87.44	840	7	5.26
吐鲁番	1987	805.90	83.37	720	6	-0.94
吐鲁番	1988	740.93	82.28	600	5	7.74
吐鲁番	1989	707.53	78.65	840	7	12.95
吐鲁番	1992	710.53	81.29	720	5	6.98
吐鲁番	1996	670.12	82.01	720	6	8.01
吐鲁番	2000	684.82	82.33	720	5	-1.95
吐鲁番	2001	676.26	80.71	600	5	9.99
吐鲁番	2002	697.85	81.01	480	4	6.05
库尔勒	2002	470.69	60.32	330	3	5.24
库尔勒	2003	474.39	62.69	345	3	-7.69
库尔勒	2004	577.61	66.98	370	4	2.56
库尔勒	2005	534.93	64.65	370	4	7.43
库尔勒	2006	566.22	64.56	420	4	5.51
库尔勒	2007	619.03	67.66	422.5	4	-27.21
巴里坤	1998	381.21	53.69	500	5	16.63
巴里坤	1999	438.89	59.65	400	4	20.26
巴里坤	2000	436.26	62.01	300	3	19.12
于田	1999	654.47	79.91	367.5	5	-0.11
于田	2001	658.61	77.41	332.5	5	9.99
博尔塔拉	1997	536.35	70.89	500	5	1.06

表格的水分亏缺率表示自然状态下的水分亏缺率,※表示通过计算得到的灌水;具体计算方法是 $IR_i = W_i - W_{i-1} + ETc_i - R_i$,式中 IR_i 表示某一旬的灌溉量, W_{i-1} 表示该旬末土壤水, R_i 表示当旬自然有效降水量, W_i 表示旬初土壤水分, ETc_i 表示当旬作物耗水量;未做标记的灌溉量表示实际灌溉次数;按照当地的灌溉制度和灌溉次数,确定量值

由表 5 可以看出,无灌溉的情况下水分亏缺率在 46.63%—87.44%,几乎所有年份都处于重旱状况。按照上文得到的指标,Ⅲ级指标(D)区间的吻合率为 77.27%(灌≥4 水)。在完全落在Ⅲ级指标区间的 44 个样本中,灌溉后增产的有 16 个,减产在 5%以下有 8 个,减产在 5%以上有 7 个。其中灌 3 水的 9 个样本 1 次灌水量为 100—185mm,灌溉量基本满足作物水分亏缺量,除巴里坤 2000 年减产率超过 10%以外,其余样本减产率均<10%,其中增产的有 3 个。落在灌 4—5 水的 25 个样本中,增产的有 10 个,且以灌 4—5 水增产幅度最大,减产在 5%以下有 7 个,减产在 5%以上有 10 个,其中超过 10%的有 2 个;落在灌 6—7 水的 8 个样本中,增产的有 2 个,减产在 5%以下有 1 个,减产在 5%以上有 5 个。比较超额灌溉年份的减产率和适量灌溉年的减产率,发现超额灌溉年份并没有随着灌溉量的增加而出现较大幅度的增产,表明节水灌溉是十分必要的,统计结果见表 6。

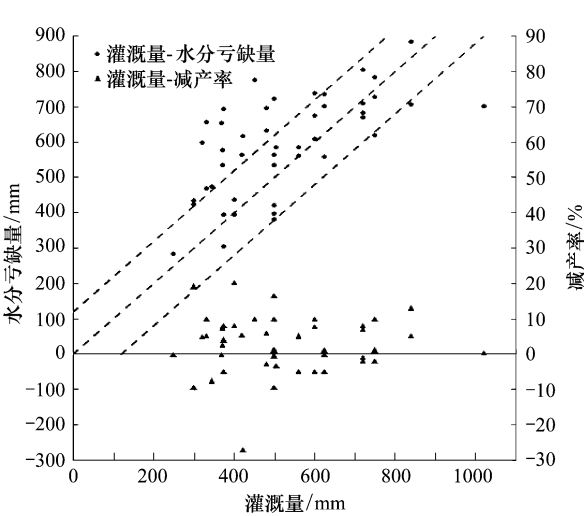


图 2 棉花水分亏缺量/灌溉量与减产率对应关系
Fig.2 The corresponding relationship of water deficit volume/irrigation volume and production rate of cotton

表 6 样本水分亏缺率均>45%,灌溉量≥250mm。由于新疆地区灌溉制度不一,取平均值 120mm 作为灌溉 1 水参考值。由图 2 可以看出,灌溉后的棉花大多增产或减产率分布在 5%以下,其中灌溉后增产的年份占所有年份的 52.27%,减产率±5%的年份占所有年份的 36.36%,表明通过灌溉可以实现稳产增产。图中 45°虚线表示水分亏缺量和灌水量完全相等时的线,虚线表示灌水偏差在 1 水范围,超过 85%的点落在虚线范围内。45°线之下点为灌溉量大于水分亏缺量的年份,表明在生产中节水的空间仍然较大,如新疆阿克苏 2007 年,灌溉 1020mm,远远大于其水分亏缺量 703.30mm,产量为平产年,并没有因为灌水增多而明显增产。45°线之上的点为灌溉量小于水分亏缺量的年份,表明该地区灌溉条件改善空间较大。

表 6 基于实际灌溉的棉花水分亏缺率等级指标的回代验证情况

Table 6 The validation of the moisture deficiency rates' grading indexes of cotton basing on irrigation										
水分亏缺率/% Moisture deficiency rates		落在不同灌水次数区间中的样本数 Number of sampling in different rang of irrigation times						灌溉后增减产的样本数 The number of sampling's yield changes after irrigation		
		1—2 水		2—4 水		≥4 水		增产	减产 5%以下	减产 5%以上
		1 to 2 irrigation times		2 to 4 irrigation times		more than 4 irrigation times				
		样本数 Number of sampling	吻合率 Accura	样本数	吻合率	样本数	吻合率			
15—30	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
30—45	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
>45	44	—	—	10	—	34	77.27%	16	8	17

—表示符合样本太少,未作统计; 增产 Number of sampling's reduction of yield less than 5%; 减产 5%以下 Number of sampling's reduction of yield less than 5%; 减产 5%以上 Number of sampling's reduction of yield more than 5%

综合实际灌溉样本完全落在指标区间的吻合率、完全落在指标区间样本实际灌水后棉花增产或减产在 5%以下、以及超量灌水导致大部样本减产 5%以上的验证结果,表明论文构建的棉花水分亏缺率等级指标是合理的、可行的。

2.2 棉花节水灌溉气象等级指标与分析

通过分析棉花全发育期的水分亏缺率、水分亏缺量与减产率的关系,构建了棉花节水灌溉 I—III 级等级指标,从理论和实际生产角度进行验证。引入 FAO-1979 产量-水分函数从理论上初步证明的指标的可行性;利用大田生产样本站点,从实际生产上验证指标的适用性。

采用同样的方法进行棉花播种-现蕾、现蕾-开花期和开花-吐絮期节水灌溉气象等级指标的构建,结果见如表 7。

表 7 棉花节水灌溉气象等级指标

发育期 Development stage	水分亏缺率/% Moisture deficiency rates			水分亏缺量(辅助指标) Quantity of water deficit (secondary indicators)		
	一级 Level I	二级 Level II	三级 Level III	一级	二级	三级
播种-现蕾	20<L≤40	40<L≤50	L>50	0.5 水	1 水	>1 水
现蕾-开花	20<L≤35	35<L≤45	L>45	0.5 水	1 水	>1 水
开花-吐絮	20<L≤35	35<L≤50	L>50	1 水	1—2 水	>2 水
生育期	15<L≤30	30<L≤45	L>45	1—2 水	2—4 水	≥4 水

表 7 中全生育期与不同生育期的指标并不完全一致,这主要是由于不同发育阶段的水分亏缺敏感指数、需水量、“补偿和超补偿效应”不同造成的^[34-35]。棉花蕾期前为营养生长阶段,该阶段地上部的茎叶生长缓慢,地下部的根系生长迅速,可以较好地利用地下水,且该发育阶段具有较强的补偿效应。另外,苗期的水分

敏感系数较小,当水分亏缺率较小时,对产量的影响并不明显^[30]。研究表明,苗期适量的干旱有利于棉花根系深扎,利于后期水肥的吸收^[36]。因此该发育阶段水分亏缺率指标值较其他发育期略大。现蕾-开花期Ⅲ级指标下限要低于其他发育期,是由于该发育阶段为棉花的生殖生长期,水分敏感系数和需水量较高的缘故。开花-吐絮期包括花铃期和吐絮期,前期水肥需求较大,后期营养生长逐步趋于停止,因此Ⅲ级下限指标值并不比苗期低。全生育期综合了各发育期的水分敏感系数、补偿效应等因素,因此Ⅰ级上、下限较分发育期略低、Ⅱ级上限与Ⅲ级下限与现蕾-开花相同。

3 结论与讨论

(1) 节水灌溉已成为农业可持续发展的方向,是我国农业现代化的必然选择^[1]。节水灌溉不同于以往的“丰水灌溉”,是为了保证水资源的持续利用和农业的可持续发展。节水灌溉从注重工程建设转移到实现水资源优化配置来满足社会可持续发展的全面要求,体现了现代水利发展的方向,是节水灌溉发展的基础^[37]。水分亏缺补偿、超补偿效应与作物水分生产函数研究表明,发展农业节水是缓解水分供求矛盾、建设高效农业需要。当前,水分不足已成为影响我国农业发展的瓶颈问题。未来气候变化与作物需水量的关系研究显示,当温度上升 1—4℃ 时,我国华北地区棉花生长期内需水量将增加 1.7%—18.3%^[38]。而节水灌溉试验在高产(增产)前提下,棉花节水灌溉可以使需水量减少 30%^[39],棉花在轻度干旱比频灌时产量要高,适当发育期适当的水分亏缺,不仅不影响产量,而且还能提高水分利用率^[40-41]。

(2) 论文从实际生产角度出发,耦合气象、土壤、产量等多元信息资料首次构建了适用于大田生产的棉花不同发育期和全生育期节水灌溉气象Ⅰ—Ⅲ级等级指标。论文得到的棉花产量与水分在干旱情况下的线性关系与俞希根等结论一致,指标初始阈值与本文结论相同^[31]。指标体系以节水灌溉理论为基础,结合 FAO-1979 产量-水分函数和大田实际水分亏缺率、水分亏缺量、灌溉量与减产率的对应关系,从理论和实际生产证明了指数的适用性。指标构建和验证资料分别利用了不同地区的独立样本。利用无灌溉或少量灌溉地区的水分亏缺率、水分亏缺量与减产率之间的关系构建指标临界阈值;利用灌溉能力强的地区无灌溉时的水分亏缺率、水分亏缺量、灌溉量和灌溉后的减产率的对应关系进行二次验证。指标构建和验证资料相互独立、互相印证。

(3) 指标体系综合考虑地区间气候、土壤、水分等差异,通过农田实时分析与未来定量预报相结合,实现分时段和滚动干旱监测、预警和响应,为开展实时、有针对性的棉花节水灌溉气象服务提供科学依据。根据论文结论,结合当前发育期前期的土壤水分、当前时段的作物耗水量、降水可以实现作物不同发育期时段的干旱监测;利用本文指标体系,考虑当前发育期土壤水分、根据 FAO-56 公式估算出下阶段作物耗水量,耦合天气预报情报,可以实现对下一阶段的干旱情况的预警和响应。

囿于资料可获取等限制,论文未考虑不同地区、作物品种、生长状况等差异,统一采用 FAO-56 推荐作物系数计算作物耗水量;论文取正常情况下的根系发育状况,未考虑土壤类型、降水、田间管理等因素对根系的影响^[36,41],并据此计算土壤有效底墒;有效降水本文取降水量^[42]。FAO-1979 产量-水分函数中产量为最高产量,论文取干旱年份下的趋势产量。此外,有关结合当地实际灌溉能力和指标细化等问题有待下一步研究。

References:

- [1] Shan L. Water-saving agriculture and of crop high efficient use of water. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2003, 33(1): 1-5.
- [2] Li Y Y. An introduction about studies on the physiology of plant drought resistance. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 1996, 4(1): 37-41.
- [3] Lu J Y, Shan L, Gao J F. Unsufficient irrigation and its physiological bases. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002, 22(6): 1512-1517.
- [4] Pang X M, Kang S Z, Wang M X. Theory and technology research development and prospect of regulated deficit irrigation on crops. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2005, 33(6): 141-146.
- [5] Kand S Z, Zhang J H, Liang Z S, Hu X T, Cai H J. The controlled alternative irrigation: a new approach for water saving regulation in farmland. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1997, 15(1): 1-6.
- [6] Fu L, Peng S Z, Li D X. Research advance of influences of regulated deficit irrigation effects of crops. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(1): 380-383.

- [7] Pan L P, Li Y, Tang L S. Growth and Allocation of Photosynthetic Produces in Cotton Under Alternative Partial Root-Zone Irrigation. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8) : 2982-2986.
- [8] Yu X G, Sun J S, Xiao J F, Liu Z G, Zhang J Y. A study on drought indices and lower limit of suitable soil moisture of cotton. *Acta Gossypii Sinica*, 1999, 11(1) : 35-38.
- [9] Intrigliolo D S, Castel J R. Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum. *Agricultural Water Management*, 2006, 38 : 472-480.
- [10] Wu J S, Kang S Z, Wang J L. Study on selection and gradation of the evaluation index of comprehensive effects in the water-saving irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(5) : 17-19.
- [11] Li B F, Feng H, Wu P T. Studies on optimum low limits of soil moisture index for deficit irrigation of crops. *Agricultural Research in the Arid Areal*, 2007, 25(3) : 227-231.
- [12] Sun L, Wang J, Chen X, Bao A M, Zhang Q. Pilot demonstration of Xinjiang cotton irrigation index system. *China Cotton*, 2004, 31(9) : 22-24.
- [13] Cai H J, Shao G C, Zhang Z H. The effect of different irrigation patterns on cotton growth and yield under the condition of drip irrigation under plastic mulch. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2002, 30(4) : 29-32.
- [14] Xiao J F, Liu Z G, Sun J S, Duan A W, Zhang J Y. Influences of water stress at different growing stages on growth, development and yield in cotton. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1999, 18(1) : 23-27.
- [15] National Bureau of Statistical of China. *China Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2010. [2012-12-18]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2010/indexch.htm>.
- [16] Li S K, Hou G L, Ouyang H, Cui D C, Zheng J F. *Agricultural Climatic Resources and Division of China*. Beijing: Science Press, 1988: 1-7/111-118.
- [17] Yang X G, Li M S, Huo Z G. *Agrometeorological disaster and Disaster reduction Technology*. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 24-27.
- [18] Wang C Y, Lou X R, Wang J L. Influence of agricultural meteorological disasters on output of crop in China. *Journal of Natural Disasters*, 2007, 16(5) : 37-43.
- [19] Peng S Z, Gao X L. Discussion on improvement of irrigated water use coefficient. *China Water Resources*, 2012(1) : 33-35.
- [20] Smout I K, Gorantiwar S D. Multilevel approach for optimizing land and water resources and irrigation deliveries for tertiary units in large irrigation schemes; 1: Method. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2005, 131(3) : 264-272.
- [21] Kumar R and Khepar S D. Decision models for optimal cropping patterns in irrigations based on crop water production functions. *Agricultural Water Managemen*, 1980, 3(1) : 65-76.
- [22] Martin D, Van Brocklin J and Wilmes G. Operating rules for deficit irrigation management. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(4) : 1207-1215.
- [23] Mao F, Huo Z G, Li S K, Hou T T. A drought model of soil moisture in seedtime of cotton in north of China. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(2) : 85-91.
- [24] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements FAO Irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: FAO, 1998.
- [25] Wang S Y, Huo Z G, Li S K, Lu Z G, Xue C Y. Risk regionalization of cotton loss caused by drought in north of China. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(3) : 267-274.
- [26] Doorenbos J, Kassam A H. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. Princeton: Rome: FAO, 1979: 1-80.
- [27] Hou G L, Chen S B. Estimating the maximum yield of main crops in Wageningen method in the Loess Plateau. *Resources Science*, 1990, 12(4) : 30-39.
- [28] Zhang W Z, Zhao C L, Kang X Y, Wang X, Liu J M, Zhang C. Study on methodology for risk assessment and division of cotton drought hazard in Hebei Province. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(2) : 10-16.
- [29] Yang S S. Study on the model of grade division of natural disaster and comparison of disastrous conditions. *Journal of Natural Disasters*, 1997, 6(1) : 8-13.
- [30] Chen Y M, Guo G S, Wang G X, Kang S Z, Luo H B, Zhang D Z. *Mai crop water requirement and irrigation of China*. Beijing: China Water & Power Press, 1995: 29-33.
- [31] Yu X G, Sun J S, Liu Z G, Duan A W, Xiao J F, Zhang J Y, Cui W J. Effects of deficit irrigation on growth, development and yield in cotton. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2000, 19(3) : 33-37.
- [32] Hu L Y, Ding Y H. *Crop Cultivation*. Beijing: Higher Education Press, 2008: 331-332.
- [33] Wang G Z. Effect of water-saving irrigation on yield of cotton in arid area. *Water & Power of Gansu Province*, 2007, 43(1) : 64-66.
- [34] Zhao L Y, Deng X P, Shan L. A review on types and mechanisms of compensation effect of crops under water deficit. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3) : 523-526.
- [35] Hu T T, Kang S Z. The compensatory effect in drought resistance of plants and its application in water-saving agriculture. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4) : 885-891.
- [36] Li Y S, Feng L P, Guo M L, Han X X. Studies on the growth characteristics of root system and its relation with cultural practices and yield in cotton (*G. hirsutum* L.) II. The effects of cultural practices on the growth of root system and its relation with above ground parts and yield of cotton. *Acta Gossypii Sinica*, 1992, 4(2) : 59-66.

- [37] Huang X Q, Gao F, Wang X J. Water saving irrigation and the sustainable utilization of water resources in 21st century. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2001, 20(3): 1-5.
- [38] Liu X Y, Lin E D. Impact of climate change on water requirement of main crops in north China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(2): 0077-0082.
- [39] Peng S Z, Zhu C L. Experimental research on crop water requirement under water-saving irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(2): 21-25.
- [40] Kang S Z, Hu X T, Cai H J, Feng S Y. New ideas and development tendency of theory for water saving in modern agriculture and ecology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(12): 0001-0007.
- [41] Hu X T, Chen H, Wang J, Meng X B, Chen F H. Effects of soil water content on cotton root growth and distribution under mulched drip irrigation. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(5): 1682-1689.
- [42] Liu Z D, Duan A W, Xiao J F, Liu Z G. Research about the optimal upper and down water content. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(3): 27-30, 34.

参考文献:

- [1] 山仑. 节水农业与作物高效用水. *河南大学学报(自然科学版)*, 2003, 33(1): 1-5.
- [2] 李云荫. 植物抗旱生理研究概述. *中国生态农业学报*, 1996, 4(1): 37-41.
- [3] 吕金印, 山仑, 高俊风. 非充分灌溉及其生理基础. *西北植物学报*, 2002, 22(6): 1512-1517.
- [4] 庞秀明, 康绍忠, 王密侠. 作物调亏灌溉理论与技术研究动态及其展望. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(6): 141-146.
- [5] 康绍忠, 张建华, 梁宗锁, 胡笑涛, 蔡焕杰. 控制性交替灌溉: 一种新的农田节水调控思路. *干旱地区农业研究*, 1997, 15(1): 1-6.
- [6] 付凌, 彭世彰, 李道西. 作物调亏灌溉效应影响因素之研究进展. *中国农学通报*, 2006, 22(1): 380-383.
- [7] 潘丽萍, 李彦, 唐立松. 局部根区灌溉对棉花主要生理生态特性的影响. *中国农业科学*, 2009, 42(8): 2982-2986.
- [8] 俞希根, 孙景生, 肖俊夫, 刘祖贵, 张寄阳. 棉花适宜土壤水分下限和干旱指标研究. *棉花学报*, 1999, 11(1): 35-38.
- [10] 吴景社, 康绍忠, 王景雷. 节水灌溉综合效应评价指标的选取与分级研究. *灌溉排水学报*, 2004, 23(5): 17-19.
- [11] 李百凤, 冯浩, 吴普特. 作物非充分灌溉适宜土壤水分下限指标研究进展. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(3): 227-231.
- [12] 孙莉, 王军, 陈嘻, 包安明, 张清. 新疆棉花精准灌溉指标体系试验示范研究. *中国棉花*, 2004, 31(9): 22-24.
- [13] 蔡焕杰, 邵光成, 张振华. 不同水分处理对膜下滴灌棉花生理指标及产量的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(4): 29-32.
- [14] 肖俊夫, 刘祖贵, 孙景生, 段爱旺, 张寄阳. 不同生育期干旱对棉花生长发育及产量的影响. *灌溉排水学报*, 1999, 18(1): 23-27.
- [15] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社. 2010. [2012-12-18]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2010/indexch.htm>.
- [16] 李世奎, 侯光良, 欧阳海, 崔读昌, 郑剑非. 中国农业气候资源与农业气候区划. 北京: 科学出版社, 1988: 1-7, 111-118.
- [17] 杨晓光, 李茂松, 霍治国. 农业气象灾害及其减灾技术. 北京: 化学工业出版社, 2010: 24-27.
- [18] 王春乙, 娄秀荣, 王建林. 中国农业气象灾害对作物产量的影响. *自然灾害学报*, 2007, 16(5): 37-43.
- [19] 彭世彰, 高晓丽. 提高灌溉水利用系数的探讨. *中国水利*, 2012, (1): 33-35.
- [23] 毛飞, 霍治国, 李世奎, 侯婷婷. 中国北方冬小麦播种期底墒干旱模型. *自然灾害学报*, 2003, 12(2): 85-91.
- [25] 王素艳, 霍治国, 李世奎, 卢志光, 薛昌颖. 北方冬小麦干旱灾损风险区划. *作物学报*, 2005, 31(3): 267-274.
- [27] 侯光良, 陈沈斌. 根据瓦赫宁根方法估算黄土高原地区一些主要作物最大产量. *自然资源*, 1990, 12(4): 30-39.
- [28] 张文宗, 赵春雷, 康西言, 王鑫, 刘晶淼, 张超. 河北省冬小麦旱灾风险评估和区划方法研究. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(2): 10-16.
- [29] 杨仕升. 自然灾害等级划分及灾情比较模型探讨. *自然灾害学报*, 1997, 6(1): 8-13.
- [30] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 康绍忠, 罗怀彬, 张大中. 中国主要作物需水量与灌溉. 北京: 水利电力出版社, 1995: 29-33.
- [31] 俞希根, 孙景生, 刘祖贵, 段爱旺, 肖俊夫, 张寄阳, 崔文军. 亏缺灌溉对棉花生长发育和产量的影响. *灌溉排水学报*, 2000, 19(3): 33-37.
- [32] 胡立勇, 丁艳锋. 作物栽培学. 北京: 高等教育出版社, 2008: 331-332.
- [33] 王贵忠. 干旱区节水灌溉对棉花产量的影响. *甘肃水利水电技术*, 2007, 43(1): 64-66.
- [34] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 水分亏缺下作物补偿效应类型及机制研究概述. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 523-526.
- [35] 胡田田, 康绍忠. 植物抗旱性中的补偿效应及其在农业节水中的应用. *生态学报*, 2005, 25(4): 885-891.
- [36] 李永山, 冯利平, 郭美丽, 韩学信. 棉花根系的生长特征及其与栽培措施和产量关系的研究 II 栽培措施对棉花根系生长的影响及其与地上部分和产量的关系. *棉花学报*, 1992, 4(2): 59-66.
- [37] 黄修桥, 高峰, 王宪杰. 节水灌溉与 21 世纪水资源的持续利用. *灌溉排水学报*, 2001, 20(3): 1-5.
- [38] 刘晓英, 林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响. *水利学报*, 2004, 35(2): 0077-0082.
- [39] 彭世彰, 朱成立. 节水灌溉的作物需水量试验研究. *灌溉排水学报*, 2003, 22(2): 21-25.
- [40] 康绍忠, 胡笑涛, 蔡焕杰, 冯绍元. 现代农业与生态节水的理论创新及研究重点. *水利学报*, 2004, 35(12): 0001-0007.
- [41] 胡晓棠, 陈虎, 王静, 蒙晓斌, 陈福宏. 不同土壤湿度对膜下滴灌棉花根系生长和分布的影响. *中国农业科学*, 2009, 42(5): 1682-1689.
- [42] 刘战东, 段爱旺, 肖俊夫, 刘祖贵. 旱作物生育期有效降水量计算模式研究进展. *灌溉排水学报*, 2007, 26(3): 27-30, 34.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.22 Nov., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The review of methods for mapping species spatial distribution using presence/absence data LIU Fang, LI Sheng, LI Diqiang (7047)
- A research review of landscape service LIU Wenping, YU Zhenrong (7058)
- Progress on techniques for partitioning soil respiration components and their application in cropland ecosystem CHEN Minpeng, XIA Xu, LI Yinkun, MEI Xurong (7067)

Autecology & Fundamentals

- Effect of different stubble height treatments on the annual growth index and physiological characteristics of *Tetraena mongolica* in two growing seasons WANG Zhen, ZHANG Liwen, YU Yi, et al (7078)
- Photosynthetic characteristics of an endangered species *Tetrameles nudiflora* under different light and water conditions DENG Yun, CHEN Hui, YANG Xiaofei, et al (7088)
- The compensation capacity of tillering and production of main stem nodes in rice WEI Ming, LI Dongxia (7098)
- Simulation of leaf area and dry matter production of tobacco leaves based on product of thermal effectiveness and photosynthetically active radiation ZHANG Mingda, LI Meng, HU Xueqiong, et al (7108)
- Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain TIAN Shenzhong, WANG Yu, LI Na, et al (7116)
- Effects of the *Larix gmelinii* grown under different light intensities on the development and defensive enzyme activities of *Lymantria dispar* larvae LU Yifang, YAN Junxin, LI Shuangwen, et al (7125)
- Biological control efficiency of *Orius similis* Zheng (Hemiptera: Anthocoridae) on *Frankliniella occidentalis* (Pergande) under different spatial and caged conditions MO Lifeng, ZHI Junrui, TIAN Tian (7132)
- Preliminary study on scavenging mechanism of dissolved aluminum by phytoplankton WANG Zhaowei, REN Jingling, YAN Li, et al (7140)
- Leaf-form characteristics of plants in *Quercus aquifolioides* community along an elevational gradient on the Balang Mountain in Wolong Nature Reserve, Sichuan, China LIU Xingliang, HE Fei, FAN Hua, et al (7148)
- Comparison of shrimp density between the Minjiang estuary and Xinhua bay during spring and summer XU Zhaoli, SUN Yue (7157)
- The feeding selectivity of an herbivorous amphipod *Ampithoe valida* on three dominant macroalgal species of Yundang Lagoon ZHENG Xinqing, HUANG Lingfeng, LI Yuanchao, et al (7166)

Population, Community and Ecosystem

- Effects of four different agricultural prevention and control measures on rice yellow stem borer *Tryporyza incertulas* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae) ZHANG Zhenfei, HUANG Bingchao, XIAO Hanxiang, et al (7173)
- Soil nitrogen concentrations and transformations under different vegetation types in forested zones of the Loess Gully Region XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (7181)
- Ecosystem health assessment based on diagnosis CAI Xia, XU Songjun, CHEN Shanhao, et al (7190)
- The production and accumulation of phytoliths in rice ecosystems: a case study to Jiaxing Paddy Field LI Zimin, SONG Zhaoliang, JIANG Peikun (7197)
- Application of a free search-based projection pursuit model in investigating reed in wetlands LI Xinhua, ZHAO Chengyi (7204)

- Soil microbial diversity under typical vegetation zones along an elevation gradient in Helan Mountains
..... LIU Bingru, ZHANG Xiuzhen, HU Tianhua, et al (7211)
- Effects of shrub encroachment on biomass and biodiversity in the typical steppe of Inner Mongolia
..... PENG Haiying, LI Xiaoyan, TONG Shaoyu (7221)
- Research on diaspore morphology and species distribution of 80 plants in the hill-gully Loess Plateau
..... WANG Dongli, ZHANG Xiaoyan, JIAO Juying, et al (7230)
- Habitat suitability assessment of blue sheep in Helan Mountain based on MAXENT modeling
..... LIU Zhensheng, GAO Hui, TENG Liwei, et al (7243)
- Characteristic of phytoplankton primary productivity and influencing factors in littoral zone of Lake Taihu
..... CAI Linlin, ZHU Guangwei, LI Xiangyang (7250)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- Responses of soil respiration to changes in depth of seasonal frozen soil in Ebinur Lake area, arid area of Northwest China
..... QIN Lu, LV Guanghui, HE Xuemin, et al (7259)
- Seasonal and annual variation characteristic in basal soil respiration of black loam under the condition of farmland field
..... ZHANG Yanjun, GUO Shengli, LIU Qingfang, et al (7270)
- Resource and Industrial Ecology**
- Economic evaluation and protection of *Amygdalus mira* genetic resource ZHANG Lirong, MENG Rui, LU Guobin (7277)
- Meteorological grading indexes of water-saving irrigation for cotton XIAO Jingjing, HUO Zhiguo, YAO Yiping, et al (7288)
- Research Notes**
- Sprouts characteristic structure of *Taxus yunnanensis* plantation SU Lei, SU Jianrong, LIU Wande, et al (7300)
- The effects of forest conversion on soil N mineralization and its availability in central jiangxi subtropical region
..... SONG Qingni, YANG Qingpei, YU Dingkun, et al (7309)

《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 杨志峰

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 22 期 (2013 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 22 (November, 2013)

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



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元