

利用 CERES – Wheat 模型分析冬小麦所需 灌溉量的时空变化 ——以河南省为例

赵海燕¹, 侯美亭², 王志伟¹

(1. 山西省气候中心, 山西 太原 030006; 2. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要: 基于河南省 16 个站点 1961—2009 年的逐日气象数据, 运用 CERES – Wheat 模型对冬小麦所需灌溉量进行了模拟, 分析了河南冬小麦所需灌溉量的时间变化和空间分布特征, 并对比了河南不同区域冬小麦在不同生育期所需的灌溉量。结果表明: (1) 河南冬小麦生育期所需灌溉量呈现北多南少的格局。出现这种格局的可能原因是, 河南北部小麦生育期降水量少于南部, 降水量少导致对灌溉的依赖程度大; 河南少水年、平水年和多水年的作物所需灌溉量分别 307 ~ 499、256 ~ 432 mm 和 169 ~ 372 mm, 分布格局均呈北部多、南部少的分布特征。(2) 主要分布在东部平原区的 10 个站点的冬小麦所需灌溉量呈显著递减趋势 ($P < 0.05$)。在这些站点, 小麦所需灌溉量与同期蒸散量显著相关, 因此, 河南东部冬小麦生长期蒸散量的显著递减趋势导致了该地区冬小麦所需灌溉量也呈现显著递减趋势。(3) 在以安阳为代表的河南北部, 冬小麦主要生育期都需要灌溉, 且在顶小穗形成期和成熟期所需灌溉量最大; 在以南阳为代表的河南南部, 在降水量较少年份冬小麦主要生育期需要灌溉, 同样在顶小穗形成期和成熟期所需灌溉量最大, 而在降水量较多年份, 尽管全生育期所需灌溉量总量较少, 但在顶小穗形成期的灌溉量仍然最多。

关键词: CERES – Wheat 模型; 灌溉量; 干旱; 冬小麦

中图分类号: S274; S512.1⁺1 **文献标志码:** A

Evaluation of irrigation water requirement of winter wheat using the CERES – Wheat Model ——A case study in Henan Province

ZHAO Hai-yan¹, HOU Mei-ting², WANG Zhi-wei¹

(1. Shanxi Climate Center, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

2. China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: Soil water balance of CERES – Wheat was assessed for Zhengzhou of Henan province. Based on validation of water balance, daily weather data of 16 stations in Henan to model irrigation requirement of crop during 1961—2009, and temporal and spatial characteristics of irrigation requirement of crop were analyzed. Irrigation requirement at every stage was compared between the northern and the southern regions in Henan. The results showed: (1) the irrigation requirement of crops in the northern regions was more than that in the southern regions in Henan, with irrigation amounts being 307 ~ 499 mm for dry years, 256 ~ 432 mm for normal years, and 169 ~ 372 mm for wet years; (2) irrigation requirement of crops showed decreasing trend in most of the eastern region. Significant correlation between irrigation requirement and evapotranspiration existed; (3) The irrigation requirements reached the highest level in the apical spikelet formation and mature period; in some year with less precipitation, the winter wheat in the southern regions is similar to in the northern regions. Even for years with more precipitation, irrigation requirement was necessary at the stage apical spikelet formation.

Keywords: CERES – Wheat model; irrigation requirement; drought; wheat

收稿日期: 2014-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(41201044); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306038); 山西省科技攻关计划(20130311037-2); 山西省气象局重点课题(No. SXKYBQH20127410)

作者简介: 赵海燕(1980—), 女, 山西晋城人, 博士, 主要从事气候变化及其对农业影响研究。E-mail: zhaohy@cma.gov.cn

近百年来,尤其是 20 世纪中期以来,全球气候正经历着以全球变暖为主要特征的显著变化。尽管全球变暖的原因目前依然存在争议,然而主要由人类活动引起的温室气体排放增加已被普遍认为在全球变暖中扮演了关键角色^[1]。全球变暖已经并将持续对水资源产生重大影响。IPCC 第四次评估报告指出,预计到 21 世纪 50 年代,在中亚、南亚、东亚和东南亚地区,大的江河流域可用淡水会减少,干旱区会面临更大范围的缺水压力^[2]。在此背景下,气候变暖有可能使我国 21 世纪面临更严重的水资源危机^[3-4]。我国水资源短缺的严峻形势对灌溉农业的发展提出了更高的要求,即要在农业用水总量基本不增加的条件下提高农业综合生产能力,建设节水高效的现代农业^[5-6]。实现这一目标的核心问题是提高农业水分利用效率^[7],充分掌握气候变暖背景下作物所需灌溉量的变化,将会为我国水利工程建设 and 应对气候变化提供重要参考。

作物需水量是确定作物所需灌溉量的基础。作物需水量通常指作物在土壤水肥条件适宜、管理良好、生长正常、能达到高产潜力条件下的棵间蒸发量与植株蒸腾量之和^[5]。针对作物需水量,国内外开展了很多研究,最早的研究为实验观测法,主要研究成果为彭曼公式和 Priestly - Taylor 法的提出^[8]。20 世纪 70 年代以来,随着新理论和新技术的出现,作物需水量研究也有了新的进展,主要分为三个方面:第一,涡度相关法的应用。涡度相关法目前已经成为精确计算均匀下垫面作物蒸发量的主要方法^[9];第二,考虑作物与大气相互作用机制的模拟方法。Penman 等^[10]对小麦群体中不同高度的辐射、温度和湿度变化的观测,是作物群体内湍流研究的较好先例。BAHC (Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle) 发展了土壤 - 植被 - 大气能量和水分传输模式^[11],在此基础上,一系列作物需水量模型应运而生,如逐日均值修正模型^[12]、根据天气预报修改的彭曼公式^[13]、水稻神经网络技术估算法^[14]、逐日参考作物腾发量 ET_0 预测模型^[15]以及傅立叶级数模型^[16];第三,除了专门的作物需水量模型以外,包含作物需水量部分的农业系统模型也有很大的发展,例如 RZWQM 模型^[17]、WOFOST 模型^[18-19]、CERES 模型^[20]、EPIC 模型^[21]等,其中,由 Ritchie 发展的 CERES - Wheat 模型是一个比较完善的农田水分管理系统模型,该模型把土壤水分运动规律和作物耗水规律结合起来,建立了土壤水分与灌溉管理子系统,基于该子系统得到的土壤水分损耗,可以合理地反映出作物所需灌溉量特征^[22]。运用农业系统模

型模拟作物需水量的优势还在于,模型可以考虑作物不同生长发育阶段的水分需求特点。

在我国,以往研究多是采用基于经验公式、或基于参考作物需水量与作物系数的计算方法,来寻找作物所需灌溉量的时空变化^[5,23-24]。作物模型物理机制完整,作为可表征作物水分需求的一个重要工具,在评估作物所需灌溉量方面受到的关注相对较少。本研究运用 CERES - Wheat 模型,以我国粮食主产区——河南省为例,对冬小麦的所需灌溉量进行时空分析,并对比了河南不同区域冬小麦在不同生育期的所需灌溉量。与作物需水量相比,作物所需灌溉量结合了不同生育期内的降水实况,能为农户灌溉和政府农田水利工程建设提供更直接的信息,还可以加深对水分利用现状的理解,为灌区节水潜力策略提供参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

河南省位于中国中东部、黄河中下游,地势西高东低,北、西、南三面的太行山、伏牛山、桐柏山、大别山沿省界呈半环形分布;中、东部为华北平原南部;西南部为南阳盆地。河南属暖温带 - 亚热带、湿润 - 半湿润季风气候,年平均降水量约为 500 ~ 900 mm,南部及西部山地较多,大别山区可达 1 100 mm 以上。河南是我国冬小麦的第一生产大省,其小麦产量所占比例超过全国的 1/4,因此河南小麦的严重减产将会影响到我国整个小麦市场。

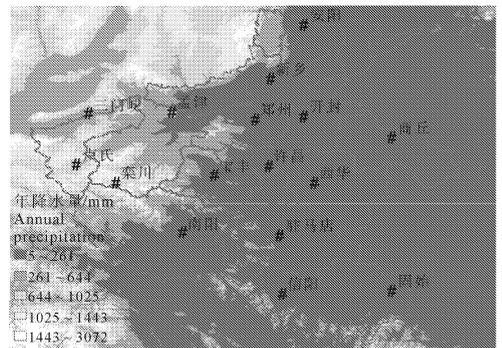


图 1 研究区域和站点分布

Fig. 1 Study areas and spatial distribution of 16 meteorological stations in Henan Province

1.2 数据来源

本文基于河南省 16 个站点(图 1)1961—2009 年的逐日气象数据,使用 CERES - Wheat 模型对冬小麦的所需灌溉量进行了模拟。模拟时,统一设置播种期为每年第 293 天,收获期为自然成熟期。本文

选取了农业气象数据较完整的郑州站的 10 cm、20 cm 和 50 cm 的土壤湿度,对 CERES - Wheat 模型水分模拟能力进行了验证。农业气象数据的时间长度为 2007 年 10 月中旬至 2008 年 5 月下旬和 2008 年 10 月中旬至 2009 年 6 月上旬,去除土壤湿度观测前有灌溉的记录,本研究选取 27 条土壤湿度记录与相应时间的土壤湿度模拟值进行对比分析。资料由国家气象信息中心提供,均经过质量检验。

1.3 CERES - Wheat 模型介绍

有关 CERES - Wheat 模型在本研究区域的适用性、以及作物遗传参数的确定已有过较为严密的验证^[25],这里不再详细描述。由于本文用到的数据主要是与土壤水分相关,因此,仅对该模型的土壤水分平衡部分进行介绍^[26]。

土壤水分的收入由降水、灌溉、融雪和径流量决定。融雪量由当日最高气温和积雪量共同决定;径流量考虑了土壤质地、坡度及土壤水分状况。进入土壤的水分逐层向下入渗,当土层饱和时,土壤水分发生饱和入渗;当土层水分含量介于田间持水量(DUL)和饱和持水量(SAT)之间时,土壤水分发生非饱和入渗。

由气象条件决定的潜在蒸发和潜在蒸腾主要利用温度和辐射计算得到,且考虑了不同生育期和叶面积指数对反射率的影响。土壤实际蒸发分为土壤水分供应充足和土壤水分供应受限两个阶段。累积蒸发量和当日蒸发量由萎蔫系数(LL)、DUL 和 SAT 共同决定。第一阶段的累积蒸发存在上限(U),U 由土壤质地决定,当达到 U 时,蒸发进入第二阶段;第二阶段的累积蒸发同样由 LL、DUL 和 SAT 共同决定,当日蒸发与前一天累积蒸发和进入第二阶段的天数有关。作物蒸腾与气象条件有关,与土壤水分状况和根系吸收能力也有关。受根长密度和叶面积指数影响的根系吸收能力与潜在蒸腾共同决定实际蒸腾。土壤各层的水分含量应减去蒸发和蒸腾的水分支出。

由于土壤各层的水分收支不均匀导致各土层的湿度存在一定的差异,从而在相邻两层间形成湿度梯度,土壤水分开始扩散。土壤水分扩散受相邻两层的土壤有效水分(土壤含水量减去 LL)共同影响。各层的水分含量在计算层间水分扩散的基础上重新计算。

CERES - Wheat 模型的土壤水分平衡过程及其物理机制考虑比较完整,考虑了水分的收入、分配、支出和再分配等过程及供求制约关系。且在考虑物理机制的前提下,利用经验统计方法对各子过程进

行估计,使之尽可能准确、可靠和简化。

需要指出的是,本研究把 CERES - Wheat 模型在自动灌溉条件下的灌溉量定义为作物所需灌溉量,而灌溉量由当日土壤含水量决定:当日土壤含水量小于土壤有效水分 50% 时即开始灌溉,土壤含水量达到土壤有效水分 100% 时灌溉结束,灌溉效率为 0.75。作物所需灌溉量,可以认为是作物产量达到光温生产潜力所需的灌溉量。

CERES - Wheat 模型要求输入农田土壤剖面层次的理化性状数据。本文收集整理了河南省褐土、潮土、黄褐土、砂姜黑土、水稻土和粗骨土等 6 种土类每个土层的相关数据,主要包括农田坡度,土壤名称和质地,剖面土层数目、颜色,各层粘粒含量、粉砂粒含量、砂粒含量、> 2 mm 石砾含量,各层有机碳含量、养分含量、阳离子交换量及 pH 值等。

1.4 降水年型划分

干旱的发生不仅与降水量的多少有关,而且受到同期蒸散量的影响,因此本文采用降水量与同期蒸散量的比值对降水年型进行划分,方法如下:

$$Ratio_i = 100 \times Prec_i / Et_i \quad (1)$$

$$Ratio_L = a \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ratio_i \quad (2)$$

$$Ratio_H = b \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ratio_i \quad (3)$$

式中, $Ratio_i$ 为历年降水量与同期蒸散量的比值; $Prec_i$ 、 Et_i 分别为历年生育期内降水量和蒸散量; n 为统计年份数; $Ratio_L$ 、 $Ratio_H$ 分别为最低阈值和最高阈值; a 、 b 为参数,取 $a = 0.75$ 、 $b = 1.25$ 。

在阈值确定后,分别统计各站点不同降水年型的历年平均作物所需灌溉量作为该降水年型的作物所需灌溉量。不同降水年型作物所需灌溉量分布图基于 Arcgis9.3 平台制作,分布图中的等级划分采用了自然断点法。

表 1 降水年型划分

Table 1 Classification of annual precipitation

降水年型 Classification of annual precipitation	$Ratio_i$
少水年 Dry year	$Ratio_i \leq Ratio_L$
平水年 Normal year	$Ratio_L < Ratio_i \leq Ratio_H$
多水年 Wet year	$Ratio_i > Ratio_H$

2 结果与分析

2.1 土壤湿度模拟效果的验证

为了验证 CERES - Wheat 模型的水分模拟能力,运用文献[25]的作物遗传参数和田间试验数据,

模拟了郑州 2007—2008 年和 2008—2009 年冬小麦生长期的各层土壤湿度,通过分析模拟和实测土壤湿度的相关性来评估 CERES - Wheat 模型的水分模拟能力。

CERES - Wheat 模型可以输出 9 层土壤(表 2)的含水量。而郑州站仅有 10、20 cm 和 50 cm 三个层次上的土壤湿度数据是可利用的,因此验证时也仅使用了 CERES - Wheat 模型 SW2D, SW3D 和 SW5D 三个土层的土壤湿度数据与实际观测进行对比。

表 2 CERES - Wheat 模拟与实测的土壤湿度的垂直分层

Table 2 Vertical profile of soil moisture in CERES - Wheat model versus in situ observation

CERES - Wheat 模型中的土层 Soil layers of CERES - Wheat model	模拟土壤湿度的土壤分层 Simulated depths of soil layers/cm	实测土壤湿度的土壤分层 Observed depths of soil layers/cm
SW1D	0 ~ 5	—
SW2D	5 ~ 15	10
SW3D	15 ~ 30	20
SW4D	30 ~ 45	—
SW5D	45 ~ 60	50
SW6D	60 ~ 90	—
SW7D	90 ~ 120	—
SW8D	120 ~ 150	—
SW9D	150 ~ 180	—

CERES - Wheat 模型直接输出的土壤湿度为土壤体积含水量($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$),郑州站实测土壤湿度为相对湿度,故二者需要进行数值单位的统一。

土壤体积含水量可表示为:

$$\text{Mois}_1 = w \times p \quad (4)$$

其中, Mois_1 为土壤体积含水量; w 为土壤重量含水量; p 为土壤容重。郑州的土壤为砂壤土,土体厚度 100 cm,典型立体剖面可分为三层,分别是 0 ~ 22、22 ~ 67 cm 和 67 ~ 100 cm,作物模型模拟输出的这三层的土壤容重分别是 1.21 、 $1.54 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.29 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

土壤相对湿度是指土壤重量含水量占田间持水量的百分比,可以表示为:

$$\text{Mois}_2 = 100 \times w/c \quad (5)$$

其中, Mois_2 为土壤相对湿度(%); w 为土壤重量含水量; c 为土壤田间持水量。河南郑州的田间持水量约为 18.6% ^[27]。

根据式(4)和式(5),土壤体积含水量和土壤相对湿度皆可换算为土壤重量含水量,从而二者可以直接比较,以判断作物模型的土壤水分模拟能力。

对比 10、20 cm 和 50 cm 三个层次的土壤湿度

(土壤重量含水量)表明(图 2),土壤湿度的模拟值与实测值显著相关($P < 0.05$),三个层次的相关系数分别是 0.67、0.62 和 0.52。王文佳等^[28]的研究表明运用 CERES - Wheat 模型能够对陕西杨凌的小麦全生育期 0 ~ 60 cm 土层的土壤含水量进行很好地模拟。房全孝等^[29]认为作物模型对土壤湿度的模拟深度越大效果越好,本研究的结果却表明 CERES - Wheat 模型对土壤表层 10 cm 和 20 cm 的土壤湿度的模拟能力更可靠,这可能与输出的土层湿度与实测值的深度不完全一致有一定关系。尽管如此,三个层次土壤湿度的模拟与观测值之间的相关性仍然通过了 0.05 显著性水平的检验,这表明本模型对土壤湿度的模拟效果总体上是可信的。

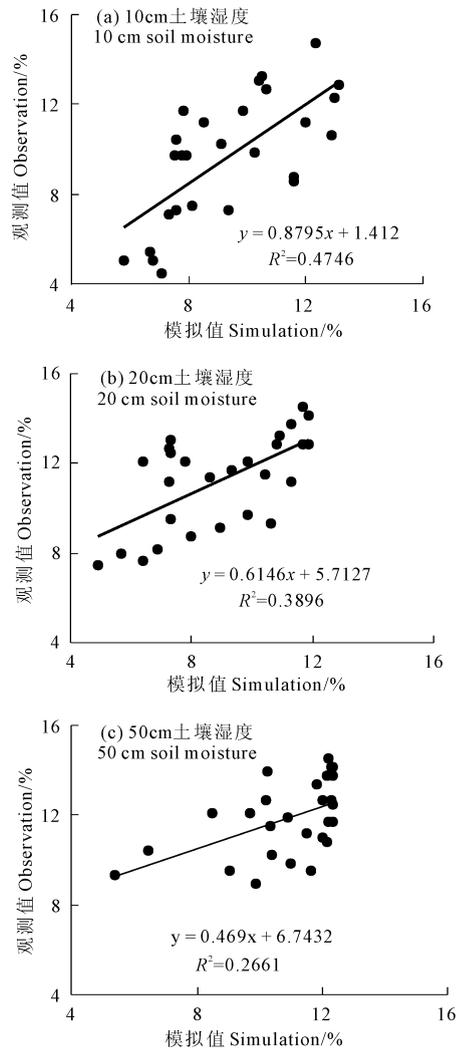


图 2 土壤湿度模拟值与实测值的对比分析
Fig.2 Comparison of soil moisture estimated by the CERES - Wheat model and in situ observation

2.2 作物所需灌溉量空间分布

作物所需灌溉量是选取 1962—2009 年历史气候数据模拟得到的平均所需灌溉量,所需灌溉量大

反映作物产量达到光温潜在生产潜力所需的灌溉量多,即小麦所受的干旱胁迫较大,农业干旱较重,反之则农业干旱较轻。分析表明,河南冬小麦生育期多年平均所需灌溉量为 252 ~ 438 mm,河南冬小麦生育期所需灌溉量呈现北多南少的格局,北部(安阳、新乡和孟津等 7 站)所需灌溉量和同期降雨量分别为 376 ~ 438 mm 和 156 ~ 236 mm,所需灌溉量超过同期降雨量的 1.5 倍;中南部 9 站点所需灌溉量和同期降雨量分别为 252 ~ 370 mm 和 243 ~ 455 mm,所需灌溉量小于同期降雨量的 1.5 倍,并且最南端的信阳和固始站所需灌溉量均低于同期降雨量的 3/5 (图 3)。该结果表明,河南北部的灌溉压力大于南部,在雨养条件下,北部小麦发生的干旱比南部更严重,这与任义方等^[30]和方文松等^[31]提出的河南省多年平均的冬小麦干旱纬向空间分布相符,也与程炳岩等^[32]的干旱灾害区域分布基本一致。另一方面,运用 CERES - Wheat 模拟冬小麦产量结果显示,在模型自动灌溉条件下,河南冬小麦的生产潜力为 6 527 ~ 7 928 kg · hm⁻²,是雨养条件下产量的 1.3 ~ 3.0 倍,北部不受水分条件限制时的生产潜力普遍大于南部,换言之,北部因缺水造成的产量损失普遍大于南部(图略)。这种格局的出现原因,可能与冬小麦生育期降水量的空间分布有关^[25],降水量少导致对灌溉的依赖程度大。统计显示,1962—2009 年的年均作物所需灌溉量与年均生育期降水量为负相关,相关系数为 -0.9355 ($P < 0.001$)。

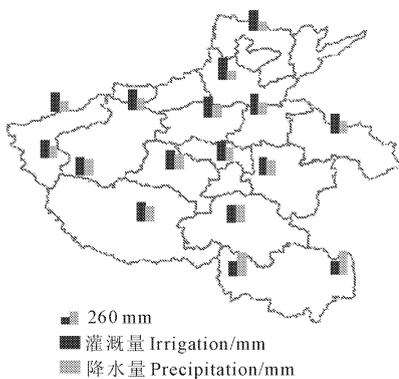


图 3 冬小麦所需灌溉量和同期降水量分布

Fig. 3 Precipitation and irrigation requirements of crops

根据降水量与蒸散量的比值划分的河南少水年作物所需灌溉量为 307 ~ 499 mm,呈现北部高、南部低的分布格局(图 4a),而且 $Ratio_i$ 越小,作物所需灌溉量越大。其中北部安阳站该年型的作物所需灌溉量为最大值,南部固始站的作物所需灌溉量为最小值,两站点在该年型的 $Ratio_i$ 分别为 20 和 62,是该年型各站点年均 $Ratio_i$ 值的最小值和次大值,

最大值为信阳的 65,信阳站在该年型的作物所需灌溉量为次小值 347 mm。

河南平年和多水年所需灌溉量分别 256 ~ 432 mm 和 169 ~ 372 mm,分布格局均与少水年相似(图 4b,4c),三门峡、商丘和南阳站的等级有所变化。形成这种分布格局的原因是无论少水年、平水年和多水年河南北部的 $Ratio_i$ 值都小于南部,如安阳的历年 $Ratio_i$ 值全部小于 60,而信阳历年 $Ratio_i$ 值除 1978 年为 59 外,其他年份均大于 60,其中在多水年的 $Ratio_i$ 值为 122 ~ 147,因此信阳站在 3 种降水年型的所需灌溉量远远小于安阳站。

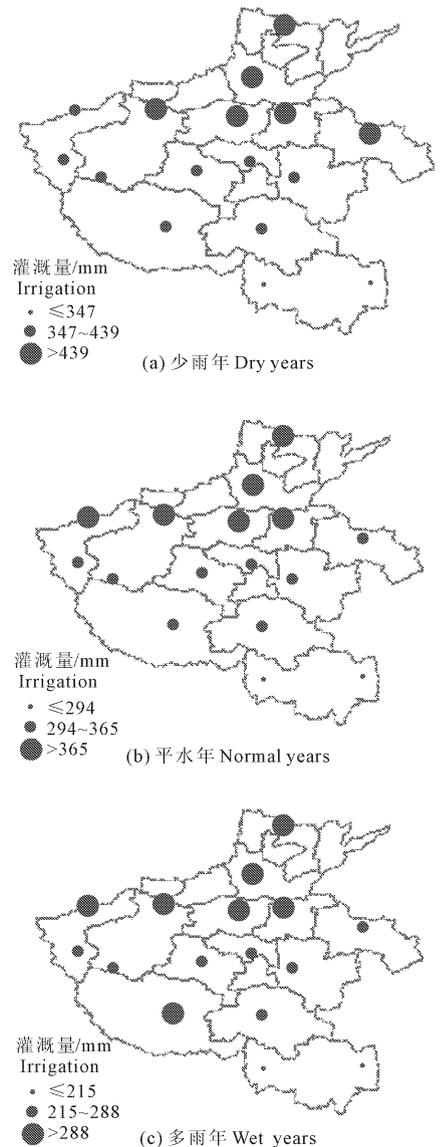


图 4 不同降雨年型作物所需灌溉量

Fig. 4 Irrigation requirements of crops in different years

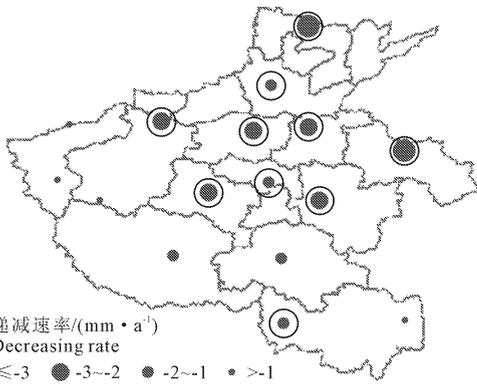
2.3 作物所需灌溉量的时间变化

河南超过一半的站点(10 个站)的作物所需灌溉量均呈显著递减趋势($P < 0.05$),主要分布在东

部平原区,递减速率达到 $-2.0 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中,河南北部的安阳和东部的商丘递减速率超过 $-3.0 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,河南西部山区和南部大部分地区的作物所需灌溉量的变化趋势不显著(图 5)。

灌溉量发生改变。由于假定土壤性质在模拟过程中未发生变化,因此引起作物所需灌溉量减小的可能原因有生育期蒸散量减少或降水量增加或二者相互叠加。

统计发现,河南所选站点的所需灌溉量与同期降水量和蒸散量的相关性均达到显著水平($P < 0.01$)(表 3)。其中,河南安阳生育期蒸散量呈显著减少趋势(图略),而同期降水量的变化趋势不显著(图略),因此可得出,假定土壤性质在模拟过程中未发生变化的前提下,河南安阳冬小麦生育期所需灌溉量显著减少的主要原因是同期蒸散量显著减少;河南卢氏生育期蒸散量和降水量变化趋势不显著(图略),其所需灌溉量也没有显著变化趋势(图 5)。另外,统计发现,河南其他站点冬小麦的生育期降水量也没有显著变化,而所需灌溉量显著减少的站点同期蒸散量均为显著减少(图略),因此可得出,在假定土壤性质在模拟过程中未发生变化的前提下,河南冬小麦生育期所需灌溉量减少的主要原因是蒸散量的减少。河南所需灌溉量的变化趋势与我国华北地区蒸散量的递减趋势一致^[33],蒸散量减少的原因可能与风速、日照时数、降水等气候要素有关^[33]。



注:○表示变化趋势达到 0.05 显著水平

Note: ○ showed significant level $P < 0.05$

图 5 冬小麦所需灌溉量的变化趋势和递减速率空间分布

Fig.5 Trends of irrigation requirement of crops

根据 CERES - Wheat 模型的土壤水分平衡过程,在冬小麦整个生育期期间,蒸散量、降水量和土壤性质等因素的变化都会引起其输出的作物所需灌

表 3 冬小麦所需灌溉量与降水量和蒸散量的相关性

Table 3 Correlations between irrigation requirement of crop and Et and precipitation

站名 Stations	降水量 Precipitation	实际蒸散量 Actual evapotranspiration	站名 Stations	降水量 Precipitation	实际蒸散量 Actual evapotranspiration
安阳 Anyang	-0.556 **	0.864 **	开封 Kaifeng	-0.640 **	0.810 **
新乡 Xinxiang	-0.602 **	0.804 **	南阳 Nanyang	-0.542 **	0.755 **
三门峡 Sanmenxia	-0.486 **	0.771 **	宝丰 Baofeng	-0.561 **	0.836 **
卢氏 Lushi	-0.573 **	0.819 **	西华 Xihua	-0.674 **	0.825 **
孟津 Mengjin	-0.348 **	0.774 **	驻马店 Zhumadian	-0.675 **	0.739 **
栾川 Luanchuan	-0.604 **	0.583 **	信阳 Xinyang	-0.593 **	0.760 **
郑州 Zhengzhou	-0.575 **	0.829 **	商丘 Shangqiu	-0.741 **	0.845 **
许昌 Xuchang	-0.684 **	0.725 **	固始 Gushi	-0.652 **	0.785 **

注: ** 表明 $P < 0.01$ 显著水平。

Notes: ** showed significant level at $P < 0.01$.

2.4 不同生育期所需灌溉量

由前两节的分析结果可知,河南北部干旱比南部更严重,本文以北部最严重的安阳和西南部水分较适宜的南阳为代表,选取典型年份,分析冬小麦各生育期所需灌溉量的变化规律及其原因。

安阳冬小麦全生育期年均降雨量 156 mm,其中,1989—1990 年和 1995—1996 年分别属于该站点的多水年和少水年,冬小麦全生育期降水量分别为 262 mm 和 113 mm,蒸散量和所需灌溉量分别是 467 mm 和 293 mm,536 mm 和 483 mm(表 4)。蒸散量分

别占到降雨量与灌溉量之和的 84% 和 89%,其他水分通过地表径流和地下径流的形式排出,还有部分水分用于土壤水分补给。

南阳冬小麦全生育期年均降雨量 270 mm,其中,1997—1998 年和 1977—1978 年分别属于该站点的多水年和少水年,冬小麦全生育期降水量分别为 315 mm 和 157 mm,蒸散量和所需灌溉量分别是 416 mm 和 183 mm,511 mm 和 455 mm(表 4),蒸散量分别占到降雨量与灌溉量之和的 84% 和 83%。

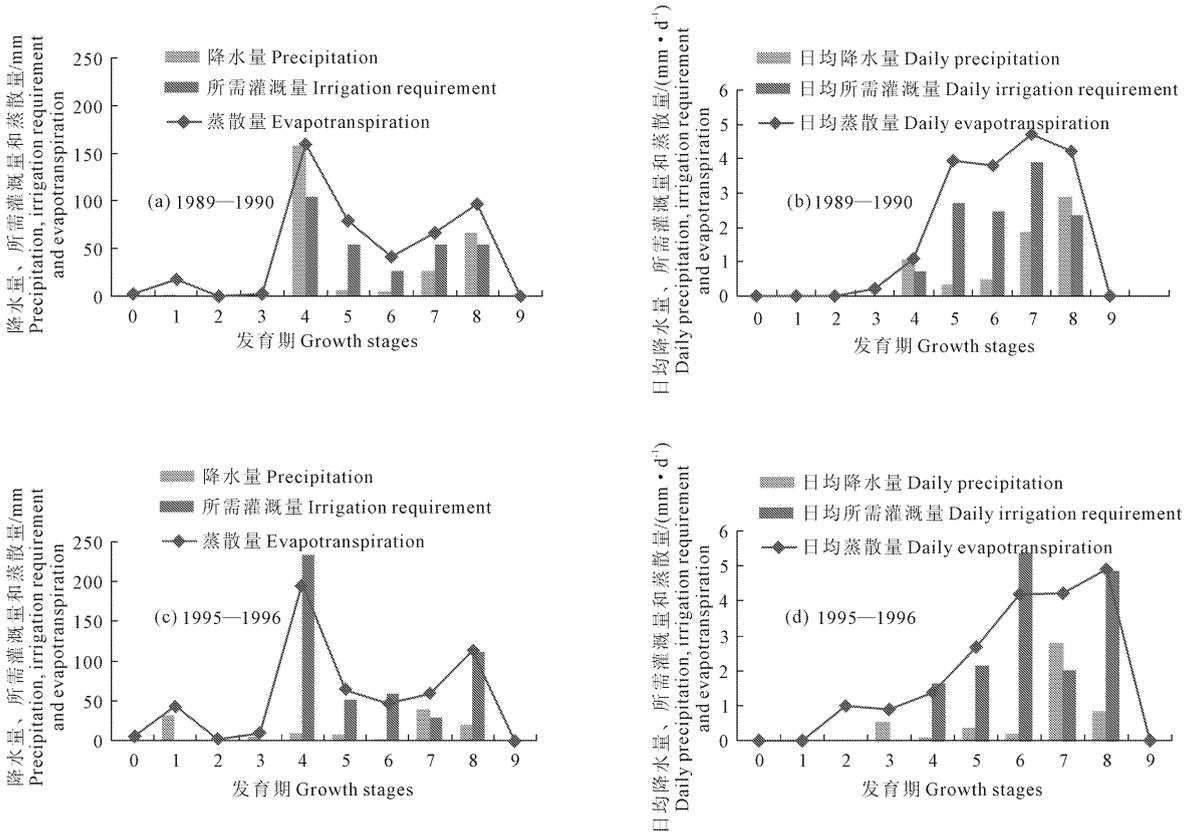
表 4 典型年份冬小麦生育期所需灌溉量、降雨量和蒸散量

Table 4 Irrigation requirement, precipitation and evapotranspiration in typical years

站点 Stations	年份 Years	所需灌溉量/mm Irrigation requirement	降雨量/mm Precipitation	蒸散量/mm Evapotranspiration	Ratio _i
安阳 Anyang	1989—1990	293	262	467	56
安阳 Anyang	1995—1996	483	113	536	21
南阳 Nanyang	1997—1998	183	315	416	76
南阳 Nanyang	1977—1978	455	157	511	31

安阳冬小麦不同生育期所需灌溉量总量(图 6a 和 6c)呈现明显的双峰型。其中,顶小穗形成期所需灌溉量为最大值。在 1995—1996 年的少水年,顶小穗形成期的降雨量少于 50 mm,所需灌溉量超过 200 mm;成熟期所需灌溉量为次大值,在 1989—1990 年成熟期的降雨量较多,所需灌溉量较少。总体而言,顶小穗形成期之前所需灌溉量很小,顶小穗形成期到成熟期的所需灌溉量比较稳定。

顶小穗的出现早晚与光温环境有关,对穗粒数和产量有重要影响^[34]。河南安阳顶小穗形成期所需灌溉量总量最大的原因是该阶段时间最长,包括小麦分蘖、越冬和返青等时期,1989—1990 年和 1995—1996 年的顶小穗形成期天数分别是全生育期长度的 65% 和 63%,故尽管该阶段所需灌溉量总量较大,但日均所需灌溉量均小于其后的各阶段(图 6b 和 6d)。



注:0,模拟开始期;1,播种期;2,萌芽期;3,出苗期;4,顶小穗形成期;5,营养期末期;6,开花末期;7,灌浆初期;8,成熟期;9,收获期。下同。
 Note: 0, starting simulating; 1, sowing; 2, germinating; 3, emerging; 4, ending of apical spikelet; 5, ending of vegetative stage; 6, ending of ear growth; 7, beginning of grain filling; 8, maturity; 9, harvest. The same below.

图 6 河南安阳典型年份冬小麦各生育期的降水量、所需灌溉量与蒸散量

Fig.6 Irrigation requirement, precipitation and evapotranspiration in typical years of Anyang in Henan

南阳冬小麦不同生育期所需灌溉量在少水年的 1977—1978 年也呈现明显的双峰型(图 7a),其中,

顶小穗形成期所需灌溉量为最大值,成熟期为次大值,两个生育期所需灌溉量均接近或超过 150 mm;

顶小穗形成期之前所需灌溉量很小;顶小穗形成期到成熟期之间各阶段所需灌溉量比较稳定,每个阶段约为 50 mm。而南阳在多水年 1997—1998 年,仅在顶小穗形成期和灌浆初期需要灌溉(图 7c)。南阳冬小麦顶小穗形成期所需灌溉量总量最大的原因

同样是该阶段在整个生育期中占的时间最长。这也导致其无论在少水年还是多水年,顶小穗形成期的日均所需灌溉量不大(图 7b 和 7d)。而其他生育期,如灌浆初期,虽然所需灌溉量总量不大,但日均所需灌溉量却大于顶小穗形成期。

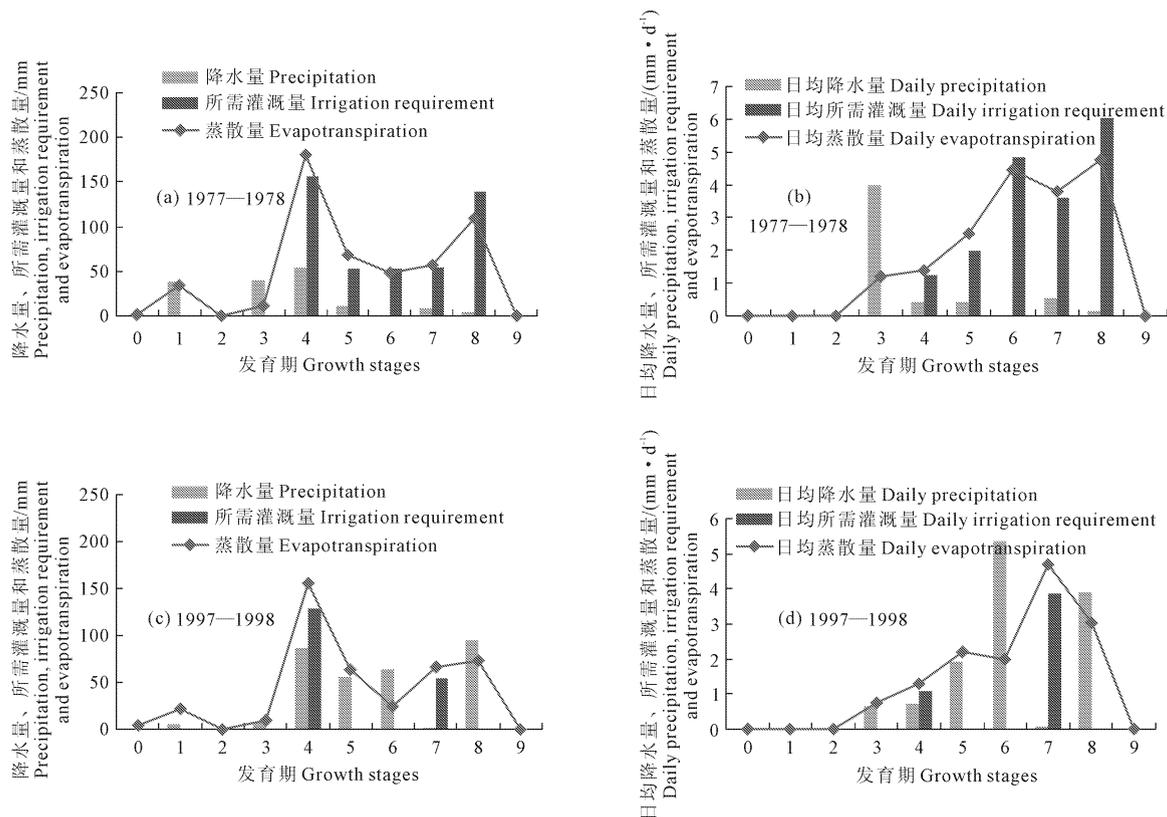


图 7 河南南阳典型年份冬小麦生育期不同生长阶段的降水量、所需灌溉量与蒸散量

Fig.7 Irrigation requirement, precipitation and evapotranspiration in typical years of Nanyang in Henan

由以上分析可知,以安阳为代表的河南北部在冬小麦主要生育期都需要灌溉,且在顶小穗形成期和成熟期的灌溉量最大;以南阳为代表的河南南部在少水年冬小麦主要生育期也都需要灌溉,同样在顶小穗形成期和成熟期的灌溉量最大,在多水年,全生育期所需灌溉量总量较少,但在顶小穗形成期的灌溉量仍最多,其他生育期所需灌溉量较少。

3 结论

利用 CERES - Wheat 模型,对 1962—2009 年河南冬小麦所需灌溉量进行了模拟,分析了河南冬小麦所需灌溉量的时间变化和空间分布特征。研究发现:

1) CERES - Wheat 模型得到的土壤湿度模拟值与田间实测值相关性较好,尤其是对土壤表层湿度的模拟能力最强。这表明,CERES - Wheat 模型适于分析作物生长发育对水分的需求特点,是评价农业

水资源的一个较好工具。

2) 河南冬小麦生育期所需灌溉量呈现北多南少的基本格局,这种格局出现的可能原因是,河南北部小麦生育期降水量少于南部,降水量少导致对灌溉的依赖程度大。河南少水年、平水年和多水年的作物所需灌溉量分别 307 ~ 499、256 ~ 432 mm 和 169 ~ 372 mm,分布格局非常相似,呈北部多、南部少的分布特征。结果表明,雨养条件下河南北部冬小麦生育期的干旱较南部更严重。

3) 半数以上站点(10 个站)作物所需灌溉量均呈显著递减趋势($P < 0.05$),主要分布在东部平原区,而西部山区和南部大部分地区的作物所需灌溉量的变化趋势不显著。河南少水年、平年和多水年的作物所需灌溉量分别 307 ~ 499、256 ~ 432 mm 和 169 ~ 372 mm,分布格局非常相似,呈北部多于南部的分布特征。

4) 以安阳为代表的河南北部在冬小麦主要生

育期都需要灌溉,且在顶小穗形成期和成熟期的灌溉量最大;以南阳为代表的河南南部在降水量较少年份冬小麦主要生育期需要灌溉,同样在顶小穗形成期和成熟期的灌溉量最大,在降水量较多年份,全生育期所需灌溉量总量较少,但在顶小穗形成期的灌溉量仍然最多,其他生育期所需灌溉量较少。因此,在降水量较少年份,河南北部和南部的冬小麦主要生育期都需要灌溉,否则小麦会受到干旱胁迫;而在河南南部的降水量偏多年份,在降水量适宜的生育期冬小麦无需灌溉,但仍然需要预防阶段性干旱的发生。

参考文献:

- [1] Oreskes N. The scientific consensus on climate change[J]. *Science*, 2004,306:1686.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[C]//Solomon, S, Qin D, Manning M, et al. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [3] 吴景社,李英能.我国 21 世纪农业用水危机与节水农业[J]. *农业工程学报*,1998,14(3):95-101.
- [4] 霍治国,姜 艳.基于灌溉的北方冬小麦水分供需风险研究[J]. *农业工程学报*,2006,22(11):79-84.
- [5] 刘 钰,汪 林,倪广恒,等.中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. *农业工程学报*,2009,25(12):6-12.
- [6] 杨晓光,陈 阜,宋冬梅,等.华北平原农业节水实用措施试验研究[J]. *地理科学进展*,2000,19(2):162-166.
- [7] 杨晓光,于沪宁.土壤水分对夏玉米农田 CO₂ 通量和群体水分利用率的影响[J]. *农业工程学报*,1999,15(3):113-118.
- [8] Ritchie J T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover[J]. *Water Resources Research*, 1972,8:1204-1213.
- [9] Garratt J R. The measurement of evaporation by meteorological methods [J]. *Agricultural Water Management*, 1984,8:99-117.
- [10] Penman H L, Long J F. Weather in wheat, an essay in micrometeorology[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1960,86:1-50.
- [11] BAHC Core Project Office. Biospheric aspects of the hydrological cycle. The operational plan. IGBP Rep. 27[R]. Stockholm, Sweden: BAHC Core, 1993.
- [12] Mao Z. Forecast of crop evapotranspiration[J]. *ICID Bulletin*, 1994, 43:23-36.
- [13] Duce P, Snyder R L, Soong S T, et al. Forecasting reference evapotranspiration[J]. *Lisbon: ISHS Acta Horticulturæ* 2000, 537(1): 135-141.
- [14] Sudheer K P, Cosain A K, Ramasastry K S. Estimating actual evapotranspiration from limited climatic data using neural computing technique[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2003, 129: 214-218.
- [15] 顾世祥,何大明,李远华,等.逐日参照腾发量预测的改进方法[J]. *水利学报*,2005,36(11):1292-1296.
- [16] 罗玉峰,崔远来,郑祖金.参考作物腾发量预报的傅立叶级数模型[J]. *武汉大学学报(工学版)*,2005,38(6):45-47.
- [17] Ma L, Ahuja L R, Ascough J C, et al. Integrating system modeling with field research in agriculture: Applications of the Root Zone Water Quality Model (RZWQM)[J]. *Advances in Agronomy*, 2000, 71: 233-292.
- [18] van Diepen CA, Wolf J, van Keulen H, et al. WOFOST: a simulation model of crop production[J]. *Soil Use and Management*, 1989, 5:16-24.
- [19] Supit I, van Diepen C A, Boogaard H L, et al. Trend analysis of water requirements, consumption and deficit of field crops in Europe [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010,150:77-88.
- [20] Ritchie J T. A user-oriented model of the soil water balance in Wheat [C]//Day W, Atkins RK. *Wheat growth and modeling*. Newyork USA: Plenum Publishing Corporation, NATOASI Series, 1985:293-305.
- [21] Williams J R, Jones C A, Kiniry J R, et al. The EPIC crop growth model[J]. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 1989,32:497-511.
- [22] 胡玉昆,杨永辉,王玉坤,等.利用作物模型估算农业需水量的探讨[J]. *节水灌溉*,2009,(11):18-20.
- [23] 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[J]. *水利学报*,2004,35(2):77-84.
- [24] 罗玉峰,彭世彰,王卫光,等.气候变化对水稻灌溉需水量的影响——以高邮灌区为例[J]. *武汉大学学报(工学版)*,2009,42(5):609-613.
- [25] Zhao H Y, Gao G, Yan X D, et al. Risk assessment of agricultural drought using the CERES-Wheat model: a case study of Henan Plain, China[J]. *Climate Research*, 2011,50:247-256.
- [26] 张 宇.CERES 小麦模式中土壤水分平衡的计算方法[J]. *气象科技*,1991,(2):81-85
- [27] 刘荣花.河南省冬小麦干旱风险分析与评估技术研究[D].南京:南京信息工程大学,2008.
- [28] 王文佳,冯 浩,宋献方.基于 DSSAT 模型陕西杨凌不同降水年型冬小麦灌溉制度研究[J]. *干旱地区农业研究*,2013,31(4):1-10.
- [29] 房全孝,于 强,王建林.利用 RZWQM - CERES 模拟华北平原农田土壤水分动态及其对作物产量的影响[J]. *作物学报*, 2009,35(6):1122-1130.
- [30] 任义方,赵艳霞,王春乙.河南省冬小麦干旱保险风险评估与区划[J]. *应用气象学报*,2011,22(5):537-548.
- [31] 方文松,刘荣花,朱自玺,等.黄淮平原冬小麦灌溉蓄水量的影响因素与不同年型特征[J]. *生态学杂志*,2009,28(11):2177-2182.
- [32] 程炳岩,钱晓燕,朱业玉.近 50 年河南干旱过程频率时空分布特征[J]. *河南气象*,1999,(1):24-25.
- [33] 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[J]. *农业工程学报*,2005,21(10):155-159.
- [34] 张国泰.小麦顶小穗的形成特点及其与大穗的关系[J]. *作物学报*,1989,15(4):349-355.