

冬小麦冠层降雨截留过程及其模拟研究

刘战东^{1,2}, 高 阳¹, 巩文军³, 段爱旺¹

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所农业部作物需水与调控重点实验室, 河南 新乡 453003;

2. 中国农业科学院 研究生院, 北京 100081; 3. 河南省焦作市广利灌区管理局, 河南 沁阳 454550)

摘 要: 冬小麦冠层截留直接影响冬小麦对降雨的有效利用, 通过模拟降雨试验和统计分析, 系统研究了降雨量、降雨强度对冬小麦冠层截留特征的影响, 建立了适于降雨冬小麦冠层截留的模型。结果表明: 棵间雨量与降雨量呈显著的正相关关系 ($P < 0.01$); 冠层截留量与降雨量呈显著的幂函数关系 ($P < 0.01$)。降雨强度与棵间雨量百分比呈负指数函数关系 ($P < 0.01$), 与冠层截留量百分比呈负幂函数关系 ($P < 0.01$)。不同降雨强度下冬小麦冠层截留过程趋势一致, 降雨强度越小, 其达到冠层截留容量时所需时间越长。降雨强度对冠层截留容量没有明显影响。在雨量恒定条件下, 冠层截留量随雨强的增加而减小, 呈明显的负相关关系。叶面积指数 (leaf area index, LAI) 与冬小麦冠层截留容量呈正相关关系 ($P < 0.01$)。构建了具有较好截留机制的冬小麦冠层降雨截留过程模型, 并基于模拟降雨和天然降雨的数据拟合了模型参数, 表征冬小麦降雨蒸发能力的参数 α 为 0.008。模拟值和实测值有较好的一致性, 显示了修正模型适用于冬小麦冠层截留计算。

关键词: 冬小麦; 降雨; 冠层截留; 模拟; 模型

中图分类号: S181.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)04-0053-06

Study on Winter Wheat Canopy Interception Process of Rainfall and Simulation

LIU Zhan-dong^{1,2}, GAO Yang¹, GONG Wen-jun³, DUAN Ai-wang¹

(1. Key Laboratory of Crop Water Use and Regulation of Ministry of Agriculture,

Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang,

He'nan 453003, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing

100081, China; 3. Guangli Irrigation Authority of Jiaozuo City, He'nan Province, Qinyang, He'nan 454550, China)

Abstract: The effective utilization of rainfall by winter wheat was directly influenced by canopy interception. Influences of rainfall and rainfall intensity on characteristics of canopy interception of winter wheat were studied by simulative rainfall experiment and statistical analysis, and a canopy interception model suitable for winter wheat was established. The results showed that throughfall was significantly positively related with rainfall ($P < 0.01$), while relationships between canopy interception and rainfall significantly showed a power function ($P < 0.01$). A negative exponential correlation between rainfall intensity and percentage of throughfall ($P < 0.01$) and a negative power correlation between rainfall intensity and percentage of interception ($P < 0.01$) were found. The trend of canopy interception of winter wheat was consistent under different rainfall intensities, while the duration to reach the canopy interception capacity was longer with lower rainfall intensity. Rainfall intensity had no significant influence on canopy interception capacity of winter wheat. Interception decreased with the increase of rainfall intensity, indicating a negative relation with rainfall intensity at the constant rainfall conditions. Canopy interception capacity of winter wheat showed a positive correlation with LAI ($P < 0.01$). A mechanism model for rainfall interception process of the winter wheat was developed, and the model parameters were fitted based on the measured data both from the natural rainfall experiment and simulated rainfall experiments. A parameter, α , indicating evaporative capacity of rainfall interception

收稿日期: 2012-01-04

修回日期: 2012-02-16

资助项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-3-1-30); 国家“863”计划“作物需水信息采集与智能控制灌溉技术” (2011AA100509)

作者简介: 刘战东 (1981—), 男, 河南沁阳人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事作物水分生理与高效用水研究。E-mail: Lzddragon@163.com

通信作者: 段爱旺 (1963—), 男, 山西黎城人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事作物水分生理与高效用水研究。E-mail: duanaiwang@yahoo.com.cn

ted by winter wheat canopy, was set to 0.008. Simulated values were consistent with measured ones, indicating that the improved model can be used for estimating rainfall interception of winter wheat canopy.

Key words: winter wheat; rainfall; canopy interception; simulation; model

作物冠层截留水量是指降雨结束时,暂时滞留于叶片、茎秆表面以及叶鞘内最后通过蒸发形式损失掉的那部分水量^[1]。从降雨有效利用的角度出发,作物冠层截留对降雨的影响是不可低估的,有必要对其做一些研究。目前,国内外对林木的降雨冠层截留过程研究相对较多,并提出了许多截留模型^[2-4],但对农田生态系统大田作物截留特征尚缺乏系统深入研究,特别是对密植矮小作物(冬小麦)的研究甚少。尽管国内一些学者针对喷灌条件下冬小麦冠层截留特征做了一些研究^[5-7],但尚未提及降雨条件下冠层截留规律,也很少涉及冬小麦冠层降雨截留模型的建立。另外,目前国内的林冠截留研究集中在大尺度大时间范围的水量分配分析,对次降雨中反映出的规律研究较少,且以线性模型的应用为主。鉴于此,本文以农作物冠层在次降雨中的截留特征为主进行分析,对非线性模型的适用性进行探讨,尝试运用半概念模型进行拟合,并提出适用于试验区冬小麦的相关参数。

由于降雨截留过程的复杂性,导致不同条件下测定的冠层截留量不具可比性。因此,本文以模拟降雨试验,探讨不同降水量、降雨强度及 LAI 条件下冠层拦截降水的能力及其差异,建立适于冬小麦冠层降雨截留的模型,以期定量确定冬小麦冠层截留量,评价麦田自然降水的利用率,促进降水资源的量化指标的研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2010 年 3—5 月在焦作市广利灌区灌溉试验站试验场中进行。试验站地理位置为 112°55'E, 35°4'N, 海拔 150 m, 多年平均气温 14.5℃, 无霜期 216~240 d, 日照时数 2 200~2 400 h, 多年平均降水量为 593.5 mm。土壤质地属在该地区具有代表性的砂质黏土, 土质分布均匀。0—200 cm 土层平均土壤干容重为 1.45 g/cm³, 田间持水率为 26%(重量含水率), 饱和含水率为 30.38%(重量含水率)。试验期间试验站内平均地下水位埋深为 6.4 m, 其中最小地下水埋深为 5.6 m, 最大地下水埋深为 7.1 m, 水位变幅不大。

1.2 试验材料与方法

供试作物为当地主要作物品种冬小麦(*Triticum aestivum* L.)品种为“温麦 19”。于 2009 年 10 月 10

日播种, 播种量为 225 kg/hm², 种植行距 20 cm, 翌年 6 月 13 日收获。播前将试验小区进行翻耕, 翻耕深度为 20—30 cm, 同时施入底肥二铵 412.5 kg/hm², 氯化钾 150 kg/hm², 尿素 150 kg/hm²。

人工降雨机装置采用“QYJY—501”式便携式野外模拟降雨机, 通过调整喷头的大小和压力获得不同的降雨强度。降雨机底座高度为 4 m, 降雨均匀系数在 80%以上。为了消除风速对冠层截留量的影响, 模拟降雨选择在没有风的早上进行。

通过对广利灌区历年降雨资料进行统计分析, 设计了 6 个降雨强度, 分别为 0.33, 0.67, 1.00, 1.33, 1.67, 2.00 mm/min, 降雨强度在小雨至大暴雨的范围内按梯度均匀分布, 且与本区夏季多暴雨的降雨特点相吻合。使降雨总量控制在 6.67~40 mm, 降雨历时为 20 min。同时选择冬小麦返青后 6 个生育阶段, 以同一降雨强度(0.67 mm/min), 同一降雨历时(20 min), 探讨不同生育阶段叶面积指数对冠层截留容量的影响。

1.3 测定项目与方法

(1) 叶面积及叶面积指数。叶面积测定采取量测法, 叶面积通过长×宽×折算系数计算叶片的近似面积; 叶面积指数(LAI)=单株叶面积×单位土地面积内株数/单位土地面积。

(2) 冠层截留量。冬小麦冠层降雨截留观测主要包括对总降雨量 P 、植株棵间雨量 PT 及茎干流量 F_s 这 3 个变量的观测, 冬小麦冠层降雨截留量由水量平衡原理计算, 公式如下:

$$I_c = P - T - F_s$$

式中: I_c ——冠层截留量(mm); P ——冠层上部雨量(mm); T ——棵间雨量(mm); F_s ——茎秆下流量(mm)。由于冬小麦植株茎干直径平均不到 1 cm, 其茎流量在整个降雨过程中占的比例很小, 因此, 忽略降雨过程中的植株茎干流量对总降雨量的影响, 即 $F_s = 0$ 。冠层截留量百分比计算公式如下:

$$I_{cp} = I_c / P \times 100\%$$

式中: I_{cp} ——冠层截留量百分比, 其他参数意义同上。

(3) 冠层截留容量。利用模拟降雨结合上述水量平衡法测定各生育阶段冠层截留容量。次降雨过程中每隔一定时间测定冬小麦冠层截留量 I_c , 当连续三次观测计算的 I_c 值变化不大(或差异不明显)时, 则认为冠层截留降雨趋于饱和, 此时三次冠层降雨截留量平均值即为该时期的冠层截留容量。

(4) 棵间雨量。棵间雨量(穿透雨)的观测采用长为 100 cm, 宽为 20 cm, 高为 10 cm 的长方形铁皮水槽(承雨槽), 每行两侧各放置 1 个接水槽, 水槽边沿与水平方面的夹角为 120° (图 1), 以保证麦行植株与接水槽紧密接触, 以使茎秆流尽量流入水槽中, 此方法可以较好的收集冬小麦冠层下面不同部位的穿透雨。在试验观测区选择 3 个 1 m 样本行, 每行两边对应各布置 1 个铁皮槽, 共布置 6 个。每次降雨过程中, 每隔一段时间, 用量筒测定时段内棵间雨量并转化为单位面积水量深。

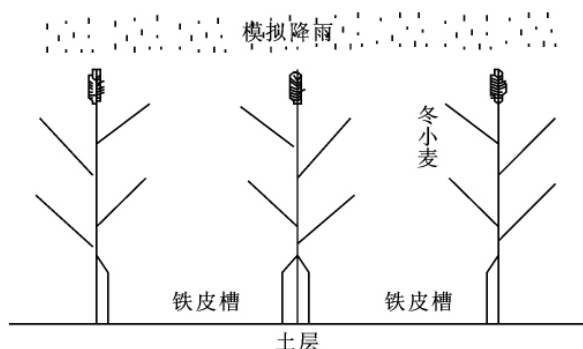


图 1 冬小麦棵间雨量测量示意图

棵间雨量百分比计算公式如下:

$$T_p = T/P \times 100\%$$

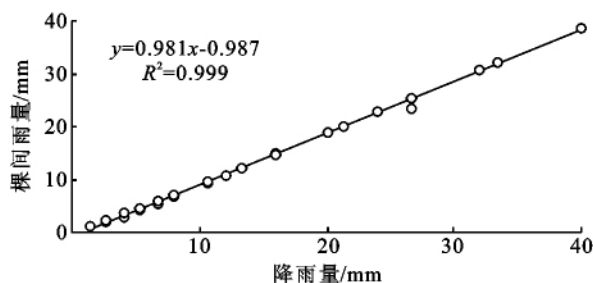


图 2 降雨量与冬小麦棵间雨量、棵间雨量百分比的关系

2.2 棵间雨量百分比、冠层截留量百分比与降雨强度的关系

选择降雨历时 20 min 的平均棵间雨量百分比来分析降雨强度对其变化的影响。按降雨强度从小到大(0.33~2.00 mm/min), 对应的平均棵间雨量占降雨量的百分比分别为 77.79%, 86.99%, 90.09%, 91.67%, 92.70%, 93.33%。通过回归分析得到降雨强度和棵间雨量百分比以及冠层截留量百分比之间的拟合曲线, 可以看出, 棵间雨量百分比随降雨强度的增加而逐渐增加, 当降雨强度超过 1 mm/min 后, 棵间雨量百分比增加趋缓。回归方程如下:

$$T_p = 96.7837 \exp(-0.0719/RI)$$

$$(n=6, R^2=0.99, P<0.01)$$

式中: T_p ——棵间雨量百分比, 下同。

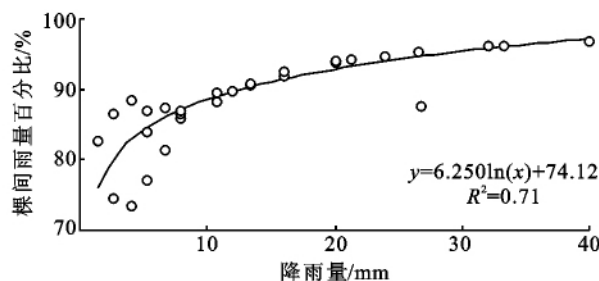
(5) 数据统计和分析。采用 Microsoft Excel 2007 软件处理数据和制图, 采用 DPS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 冬小麦棵间雨量及其百分比与降雨量的关系

图 2 为模拟的 6 次降雨中棵间雨量及其百分比与降雨量的关系图。通过回归分析, 建立了棵间雨量与降雨量的回归方程, 两者呈显著的线性正相关($P<0.01$)。根据降雨量和棵间雨量的回归方程: $T = 0.981(P - 1.22)$, 可以从理论上计算得知, 当降雨量小于 1.22 mm 时, 冬小麦冠层下将无穿透雨, 这与实际观测的 ≤ 2 mm 降雨, 没有穿透雨基本吻合, 和李衍青^[8]、Aston^[3]的研究相一致。由上述分析可见, 冬小麦冠层截留不能轻易忽略, 尤其雨量级较小时, 由于冠层截留损失, 此时降雨并非有效降水, 不能及时补充冬小麦所需水分, 需要进行补充灌溉。

棵间雨量百分比随着降雨量的增加而逐渐增大, 到最后趋于稳定值。通过对棵间雨量百分比与降雨量之间的关系进行多种函数的拟合, 比较得知对数函数具有较高的拟合性($P<0.01$)(图 2)。



式中: RI ——降雨强度(mm/min), 其他参数意义同上。

在忽略降雨期间蒸发的前提下, 冠层截留量百分比与棵间雨量百分比互为消长, 冠层截留量百分比则随降雨强度的增加逐渐减小, 拟合方程为:

$$I_{cp} = 10.23RI^{-0.67}$$

$$(n=6, R^2=0.99, P<0.01)$$

2.3 降雨强度对冬小麦冠层截留的影响

不同降雨强度条件冬小麦冠层截留试验在灌浆期(5月9日)开展。不同降雨强度下, 冬小麦随降雨历时表现出不同的截留过程和基本相同的截留容量(图 3a), 这说明降雨强度对冠层截留容量没有明显影响。且降雨强度小的处理, 其达到冠层截留容量所需时间较长。

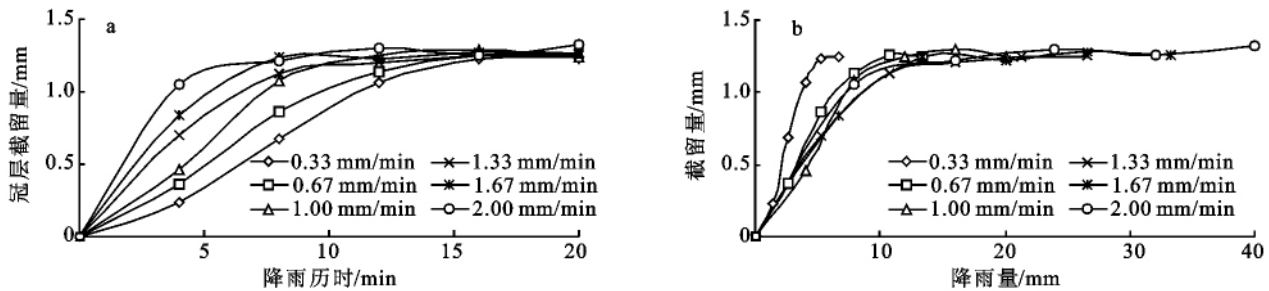


图 3 不同降雨强度下冬小麦冠层截留量随降雨时间和降雨量的变化

2.4 降雨量对冬小麦冠层截留的影响

为了分析降雨量与冠层截留量两者间关系,绘出了不同降雨强度模拟试验的冠层截留量随降雨量的变化情况图 3b。相同降雨量下,随降雨强度的增大,冠层截留量减小。呈显著的负相关关系,并且这种关系随降雨强度差别的加大而更加明显。如 0.33 mm/min 与 2.00 mm/min 相比,在降雨量接近 4 mm 时,两降雨强度下截留量相差为 0.53 mm。这是由于降雨强度越大雨滴动静越大,对冬小麦植株枝叶的打击力越大,使枝叶产生较强的震动而不利于附着降雨,从而冠层截留量越小;相反,小降雨强度下,降雨历时较长,既有利于枝叶对雨水的吸附,也使蒸发量有所增加。

当降水量小于 6 mm 时,冠层截留量随降雨量的增加而迅速增加;当降水量大于 10 mm 时,其增加速度逐渐减缓;直至接近或达到冠层截留容量后,冠层截留量的增加很少或者不再增加^[9-10]。将不同降雨强度降雨量与其冠层截留量进行相关性分析(表 1),结果表明,各降雨强度模拟试验中,两者均表现出幂函数关系,并具有较高的相关性。

表 1 不同降雨强度下冠层截留量与降雨量关系

降雨强度/ (mm · min ⁻¹)	回归方程	相关 系数	显著性
0.33	$I_c = 0.3094P^{0.7825}$	0.9756	$P < 0.01$
0.67	$I_c = 0.2889P^{0.6005}$	0.9759	$P < 0.01$
1.00	$I_c = 0.3534P^{0.4574}$	0.9600	$P < 0.01$
1.33	$I_c = 0.4887P^{0.3043}$	0.9836	$P < 0.01$
1.67	$I_c = 0.6283P^{0.2144}$	0.9853	$P < 0.01$
2.00	$I_c = 0.8334P^{0.1265}$	0.9975	$P < 0.01$

不同降雨强度条件下,各回归方程参数相差不大(表 1),这是由于冬小麦冠层截留量较小,在较短时间内,就可趋近于其冠层截留容量,因此,降雨强度对冠层截留过程影响并不明显。综合分析 6 次模拟降雨截留资料,从曲线拟合的变化趋势看,冠层截留量与降雨量之间呈显著的正相关关系,两者同样可由幂函数关系表征为: $I_c = 0.400P^{0.392}$ ($n = 30, R^2 = 0.63$)。因此,可尝试通过建立降水量与冠层截留量的

关系模型,用降雨量来估测冬小麦冠层截留量。此方法最大的优点是不需要复杂的理论推导和数学计算,形式简单,但同时也忽略了冠层特征和截留机制,势必造成估算的精度不够,尤其在雨量较大时,出现的误差较大。因冠层截留过程本身是非线性过程,除降雨量的影响外,冠层截留量大小也与冠层特征、结构及气象因子等因素有关。

冬小麦冠层截留量百分比和降雨量之间存在负相关关系,冠层截留量百分比的变化表现出阶段性,即快速下降阶段、缓慢下降阶段、相对稳定阶段,随降雨量变化呈负幂函数关系,拟合方程如下:

$$I_{cp} = 40.07P^{-0.60} \quad (n=30, R^2=0.80, P<0.01)$$

2.5 冬小麦冠层截留容量与叶面积指数的关系

LAI 是表征冠层降雨截留容量的指标^[11]。冬小麦各生育阶段 LAI 存在差异,使得模拟降雨条件下冠层截留容量各不相同,表现为 LAI 较小(3 月 29 日),截留容量也小(0.36 mm),随着 LAI 增加,冠层截留容量相应增大,在冬小麦抽穗期(4 月 30 日),LAI 达到最大(6.42 cm²/cm²),此时冠层截留容量也最大(1.34 mm)(图 4)。单因素方差分析表明,不同 LAI 的冠层截留容量差异达到极显著水平($P < 0.01$)。

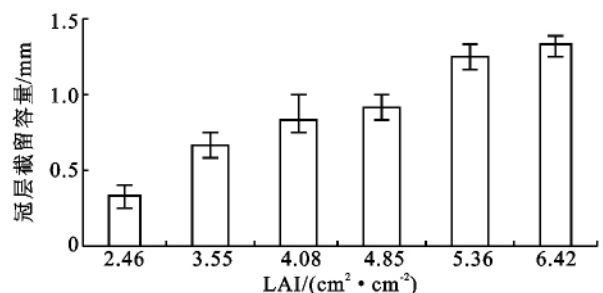


图 4 不同叶面积指数(LAI)下冬小麦冠层截留容量

2.6 冬小麦冠层截留概念模型的建立

2.6.1 模型构建 冠层截留模型对于理解冬小麦冠层降水截持作用、估算冠层截留量、模拟降雨利用过程具有重要意义。模型构建过程中,机理性模型往往需要较多的参数,应用常受较多限制;而简单的经验模型又不能很好地揭示截留作用机制。冠层截留概

念模型是认识植被冠层截留物理学过程的重要手段,这类模型大都按照截留机制,把截留量分解为吸附截留和植株体表面蒸发导致的附加截留^[2],较好地描述了冠层截留机制和过程,克服了统计模型参数物理意义不明确或与气象数据结合不紧密等缺点,具有较好的应用前景。在众多概念模型中,以 Horton 模型应用改进较多,王彦辉等人^[4]对 Horton 模型进行了必要的修正,提出的仅有 2 个独立参数(降雨蒸发率 α 和林冠吸附容量 I_{cm})的冠层截留模型:

$$I_c = I_{cm} [1 - \exp(\frac{-P}{I_{cm}})] + \alpha P \quad (1)$$

式中: I_c ——林冠截留量(mm); I_{cm} ——冠层截留容量(mm); α ——降雨蒸发率; P ——次降雨量(mm)。

上述概念模型多数局限在对林冠截留过程的模拟,很少应用到农作物上,尤其是小叶密植作物(冬小麦),考虑到林冠截留和冬小麦冠层截留的相似性,本文借鉴常见的林冠截留降雨模型的构建机理,在前人研究的基础上,引入概念模型,结合前文对冬小麦模拟降雨冠层截留过程的分析以及野外试验的实际情况,考虑作物不同生育期叶面积指数对冠层截留容量的影响,增加叶面积指数,对王彦辉等^[4]提出的模型进行修正,并将林冠截留模型应用到冬小麦冠层截留模拟中,提出一个适合冬小麦不同生育阶段的冠层截留模型,修正模型见式(2)。

$$I_c = f(\text{LAI}) \{1 - \exp[\frac{-P}{f(\text{LAI})}]\} + \alpha P \quad (2)$$

式中: I_c ——冬小麦冠层截留量(mm); α ——降雨蒸发率; P ——次降雨量(mm); LAI ——冬小麦叶面积指数(cm^2/cm^2),通过量测法获取降雨时的 LAI 值。

2.6.2 模型参数确定 冠层截留容量 I_{cm} 是表征冠层截留降雨能力的重要参数,包括叶片截留容量和茎秆吸附容量。冠层截留容量受植被叶面积指数、种植密度以及空气干燥状况等因素影响^[12-13]。确定冠层截留容量的方法主要有浸水法、基于野外试验数据的回归法以及基于微波衰减技术的遥感法等^[14-15]。

本文通过模拟降雨结合水量平衡法,测定冬小麦冠层截留容量,建立冠层截留容量与叶面积指数相关模型。将冬小麦生长期(拔节期至成熟期)群体冠层截留容量的测定值和叶面积指数(LAI)进行拟合,关系式如下:

$$I_{cm} = f(\text{LAI}) = 0.256\text{LAI} - 0.217 \\ (n=18, R^2=0.91^{**}) \quad (3)$$

通过回归分析和方差检验,冬小麦冠层截留容量与 LAI 呈线性正相关关系,回归方程达到显著性水平($P < 0.01$)。因此可通过 LAI 推算冬小麦不同生

育期的冠层截留容量。

降雨期蒸发率 α 。该参数主要受空气温度、湿度、风速等影响较大。理论上,降雨期瞬时蒸发量可采用 Penman—Monteith 公式计算,但由于该公式计算需要大量参数,并且部分动态数据较难获得。因此,将降雨期蒸发项简化为降雨量的比例。以式(2), (3)作为模型,对模型的参数进行估计,即采用麦夸特法(Levenberg—Marquardt),对冬小麦 2010 年返青后 18 次模拟降雨和天然降雨实测的次降雨量 P 和次降雨截留量 I_c 进行回归拟合,得到参数 $\alpha = 0.008$ ($R^2 = 0.81$)。值得注意的是, α 值为该地区经验值,并不能完全体现出冬小麦整个生长期的气象因子的影响状况。

2.6.3 冬小麦冠层截留的模拟 通过以上分析,本文建立的冬小麦冠层截留模型如下:

$$I_c = (0.256\text{LAI} - 0.217) \times \\ [1 - \exp(\frac{-P}{0.256\text{LAI} - 0.217})] + 0.008P$$

对建立的模型进行效果评价,通过对冬小麦返青后 15 次模拟降雨次降雨截留量实测值与模拟值进行相关分析(以 Pearson 相关系数为距离),模拟值与实测值基本吻合,两者相关系数在 0.80 以上,这表明修正模型很好地反映了实测值的变化。总体来说,建立的冬小麦冠层截留模型基本上能够反映冬小麦冠层截留的实际情况。符合作物冠层降雨截留客观规律的,但模型本身也存在一定的不足,一方面,没有考虑冠层干燥程度对截留容量的影响,这是误差产生的重要因素之一;另一方面,降雨蒸发率 α 为经验系数,过于概化气象因子的影响。此外, LAI 的获取采用量测法,本身也存在一定的人为和样本误差。因此在模型应用时,还应根据实际情况对模型中的参数进行适当调整。

3 结论

(1) 降雨量与冬小麦棵间雨量呈正相关线性关系,与棵间雨量百分比呈对数函数关系。降雨强度与棵间雨量百分比呈负指数函数关系,与冠层截留量百分比呈负幂函数关系。

(2) 不同降雨强度下冬小麦冠层截留过程趋势一致,即随着降雨历时的延长,冠层截留量表现出先持续增加后会趋于稳定(达到冠层截留容量)的趋势,且不同降雨强度下冠层截留容量基本相同。降雨强度越小,其达到冠层截留容量时所需时间越长。冬小麦在雨量恒定条件下冠层截留量随雨强的增加而减小,呈明显的负相关关系,这与曾德慧^[16]、吴旭东^[17]

等研究结果一致。冬小麦冠层截留量随降雨量增加而增加,当降雨量超过 10 mm 时,冠层截留量增加缓慢并逐渐趋向稳定,这说明冬小麦截留降雨的能力已达到饱和,对冬小麦冠层截留量与降雨量进行关系拟合,以幂函数函数拟合最为合理,这与闫文德^[18]、Hikaruk^[19]的研究结果相一致。

(3) 基于试验结果分析,构建了降雨冬小麦冠层截留量计算模型:

$$I_c = (0.256LAI - 0.217) \times [1 - \exp(\frac{-P}{0.256LAI - 0.217})] + 0.008P$$

此模型可同时反映冠层特征(叶面积指数)、气象因子及降雨量对冬小麦实际降雨截留动态的影响,具有较好的截留机制。模型模拟值和实测值较为接近,能够较准确估算冬小麦对单次降雨的冠层截留量。但降雨蒸发率 α 由于受风速、雨前冠层干燥度、湿度、温度、辐射等因素的影响,导致部分单次冠层截留量模拟出现较大误差,能否将更多影响因素融入模型中,从而更合理、有效、精确地反映实际冬小麦冠层截留的过程,还需要进一步深入探讨。另外,模拟降雨试验并不能完全代表实际降雨时的冬小麦冠层截留过程和特性,在自然环境中,如何能更好模拟冠层截留作用,还需广泛探索和深入研究。

参考文献:

- [1] Lamm F R, Manges H L. Partitioning of the sprinkler irrigation water by a corn canopy[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(4): 909-918.
- [2] 王爱娟, 章文波. 林冠截留降雨研究综述[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4): 55-59.
- [3] Aston A R. Rainfall interception by eight small trees[J]. Journal of Hydrology, 1979, 42(3/4): 383-396.
- [4] 王彦辉, 于澎涛, 徐德应, 等. 林冠截留降雨模型转化和参数规律的初步研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(6): 25-30.
- [5] 王迪, 李久生, 饶敏杰. 喷灌冬小麦冠层截留试验研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(9): 1859-1864.
- [6] 王庆改, 康跃虎, 刘海军. 冬小麦冠层截留及其消散过程[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 3-8.
- [7] Kang Y H, Wang Q G, Liu H J. Winter wheat canopy interception with its influence factors under sprinkler irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2005, 74(3): 189-199.
- [8] 李衍青, 张铜会, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿灌丛降雨截留特征研究[J]. 草业学报, 2010, 19(5): 267-272.
- [9] 孙庆艳, 余新晓, 杨新兵, 等. 密云水库集水区防护林不同树种林冠截留研究[J]. 中国水土保持科学, 2009, 6(3): 73-78.
- [10] 张焜, 张洪江, 程金花, 等. 重庆四面山三种人工林林冠截留效应研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 201-204.
- [11] 余开亮, 陈宁, 余四胜, 等. 物种组成对高寒草甸植被冠层降雨截留容量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5771-5779.
- [12] Limousin L M, Rambal S, Ourcival J M, et al. Modeling rainfall interception in a Mediterranean *Quercus ilex* ecosystem: lesson from a throughfall exclusion experiment[J]. Journal of Hydrology, 2008, 357(1/2): 57-66.
- [13] 徐丽宏, 时忠杰, 王彦辉, 等. 六盘山主要植被类型冠层截留特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2487-2493.
- [14] 卓丽, 苏德荣, 刘自学, 等. 草坪型结缕草冠层截留性能试验研究[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 669-675.
- [15] Klaassen W, Bosveld F, de Water E. Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception[J]. Journal of Hydrology, 1998, 212/213: 36-50.
- [16] 曾德慧, 裴铁璠, 范志平, 等. 樟子松林冠截留模拟实验研究[J]. 应用生态学报, 1996, 7(2): 134-138.
- [17] 吴旭东, 周梅, 张慧东, 等. 兴安落叶松林冠截留与降雨量及降雨强度的关系[J]. 内蒙古农业大学学报, 2006, 27(4): 84-86.
- [18] 闫文德, 陈书军, 田大伦, 等. 樟树人工林冠层对大气降水再分配规律的影响研究[J]. 水土保持通报, 2005, 25(6): 10-13.
- [19] Hikaru K, Yoshinori S, Tomonori K, et al. Relationship between annual rainfall and interception ratio for forests across Japan[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256(5): 1189-1197.