

旱地保护性耕作地表径流和土壤水分平衡模型

王晓燕, 高焕文, 李洪文

(中国农业大学工学院农业工程系, 北京 100083)

摘要: 在田间试验和对现有径流模型及土壤水分平衡模型改进的基础上, 建立了适用于保护性耕作的地表径流和土壤水分平衡模型。该模型以日为步长, 根据气象数据、土壤水分状况、作物生长发育及耕作管理措施, 模拟不同耕作管理体系下地表径流和田间水分平衡的变化。针对保护性耕作的特点, 主要对径流曲线数字 (USDA-Curve Number) 法进行了改进, 在 PERFECT 模型的基础上增加了坡度和降雨强度两因素的影响, 从而使模型较全面地考虑了残茬覆盖、耕作、坡度及降雨强度等多种因素对径流的影响; 采用简单实用的 Priestley-Taylor 公式计算潜在蒸散量, 并考虑作物覆盖与残茬覆盖对土壤蒸发与作物蒸腾的影响。通过田间径流试验和根层有效贮水量测定数据的验证, 证明了地表径流和土壤水分的模拟值与实测值比较接近。

关键词: 保护性耕作; 地表径流; 水分平衡; 模型; 径流曲线数字法;

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-7601(2003)03-0097-07

为解决北方干旱缺水、产量低而不稳、水土流失严重、沙尘暴猖獗等问题, 从 20 世纪 90 年代初开始, 我国科技工作者在国家和农业部有关科研项目支持下, 比较系统地开展了保护性耕作的试验研究。中国农业大学和山西省农机局合作, 在山西省开展了农机与农艺相结合的机械化保护性耕作技术试验研究, 经过近 10 a 的连续试验, 成功地研究出一套适合我国国情的一年一熟地区机械化保护性耕作的关键技术和机具体系。该研究组在山西省设立了不同类型的试验区, 研究了不同保护性耕作措施的保水增产机理, 研制了多种中小型机具^[1]; 建立了安装全自动测试装置的径流试验区, 实时监测不同降雨情况下不同耕作措施的地表径流状况, 研究保护性耕作的水土保持生态环境效应^[2]; 利用人工降雨模拟试验, 研究了不同耕作体系及不同耕作因素对地表径流和降雨入渗的影响^[3]。结果表明, 保护性耕作能够增加土壤含水量, 提高作物产量, 降低生产成本, 培肥地力, 防止秸秆焚烧, 减少水土流失, 经济、生态和社会效益明显。

在保护性耕作研究中, 除了进行长期定位试验研究外, 利用计算机模型模拟不同保护性耕作体系下的土壤—作物系统效应, 便于总结试验成果, 为研究成果的推广应用提供辅助工具。本文即在田间试验的基础上, 结合国内外研究成果, 建立了适合于分

析保护性耕作节水增产和水土保持环境效应的地表径流和土壤水分平衡模型。

针对保护性耕作生产系统的特点, 模型需考虑耕作措施、残茬覆盖等因素, 这些因素主要对地表径流和土壤蒸发有较大影响, 从而影响了水分平衡和作物生长。一些发达国家已经在这方面作了大量的工作, 如美国的 EPIC 模型和澳大利亚的 PERFECT 模型^[4,5]。本文选择 PERFECT 模型作为主要基础, 针对我国的具体情况改进与验证。以径流和蒸发模型为重点, 在模型中增加坡度和降雨强度对径流的影响, 并考虑残茬覆盖对蒸发的影响, 建立适于保护性耕作研究的地表径流和水分平衡模型。

1 模型构成

旱地农田的主要供水项为降雨, 主要支出项为地表径流和蒸发蒸腾。本模型考虑秸秆覆盖和耕作措施等对径流和蒸发的影响, 以日为步长, 模拟水分平衡的动态变化。模型可分为地表径流、蒸腾蒸发、土壤水分再分配三大部分。

1.1 地表径流子模型

采用美国土壤保持局 (SCS) 提出的径流曲线数字 (USDA-Curve Number) 方程模拟和评价保护性耕作措施对地表径流的影响。这种方法以曲线数字

* 收稿日期: 2003-01-22

基金项目: 中国—澳大利亚合作项目 (ACIAR 96/143) “可持续机械化旱作农业研究”

作者简介: 王晓燕 (1973—), 女, 内蒙古鄂尔多斯市人, 主要从事旱地农业保护性耕作技术研究。北京海淀区清华东路 17 号, 中国农业大学工学院农业工程系, 东校区 46 信箱, 100083。

(CN)的函数方式将地表径流与降雨量、土壤类型、残茬覆盖、田间管理措施等联系起来,适用于分析耕作措施因子。SCS 制定了国家工程手册,归纳了 3 000 多种土壤类型的资料,制定了一套径流曲线数字值供参考查用^[6]。

CN 法的基本公式为:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}, \quad P \geq 0.2S \text{ 时}$$

$$Q = 0, \quad P < 0.2S \text{ 时} \quad (1)$$

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (2)$$

其中, P 为降雨量; Q 为径流量; S 为下垫面的总持水量。这种方法的关键是如何将 CN 这一指标与不同的影响因子联系起来,进行修正。本模型在 PERFECT 模型的基础上加入坡度和降雨强度两因素,对 CN 法进行了改进,考虑秸秆覆盖、耕作、土壤水分、坡度及降雨强度等对径流的影响,建立适合于保护性耕作的径流模型。

1.1.1 坡度的修正 选用 EPIC 模型中的经验公式^[7]:

$$CN_{2s} = 1/3(CN_3 - CN_{2b})(1 - 2e^{-13.86s}) + CN_{2b} \quad (3)$$

式中: CN_{2b} 为坡度为 5% 时,中等含水量条件下,裸露地表的 CN 值; CN_{2s} 为 CN_{2b} 经坡度修正的值; s 为地表平均坡度; CN_3 为土壤比较湿润条件下的 CN 值:

$$CN_3 = CN_{2b} \times e^{0.00673(100 - CN_{2b})} \quad (4)$$

综合(3)、(4)式, CN_{2s} 值随坡度变化的曲线如图 1; 坡度 s 小于 5% 时, CN_{2s} 值对其变化最敏感,通常坡度每变化 1%, CN_{2s} 值将相应地变化 1 个单位,但变化的上限为 5 个单位; 坡度 > 5% 时, CN_{2s} 值随坡度变化的敏感性降低; 当坡度 > 25% 时, CN_{2s} 值基本不再随坡度变化,国际上一般认为这么大的坡度

不适于农业种植。

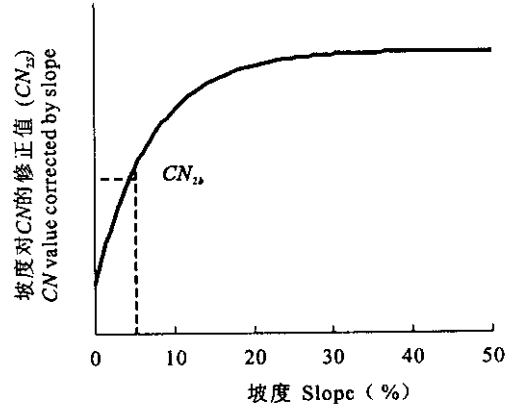


图 1 坡度对 CN_{2s} 的影响示意图

Fig. 1 Sketch map of the effect of slope on CN_{2s}

1.1.2 覆盖的修正 模型可逐日模拟覆盖率的变化,使 CN 随覆盖率逐日变化,从而定量分析不同的耕作体系对径流和蒸发的影响。通过降雨模拟试验得出 CN 值与秸秆覆盖率之间近似呈线性负相关^[8], CN 与残茬覆盖率的定量关系:

$$CN_{2c} = CN_{2s} - CN_{2re} \times cov \quad (5)$$

$$cov = covm + 0.5C_{cov}$$

式中, CN_{2c} 为经过秸秆覆盖修正的 CN 值; CN_{2re} 为系数,表示覆盖率由 0% 增大到 100% 时, CN 值减小的最大量; cov 为作物覆盖与地表残茬覆盖的综合覆盖率(%); C_{cov} 为作物覆盖率(%),与叶面积指数(LAI)有关; $covm$ 为残茬覆盖率(%),在残茬耕作模型中计算。“残茬耕作子模型”中,耕作主要通过影响地表粗糙度和残茬覆盖量来影响径流量,针对不同机具作业(如翻耕、耙地等),给出其对地表粗糙度和残茬覆盖率影响的经验值,如表 1。

表 1 不同耕作机具对秸秆覆盖和地表粗糙度的影响

Table 1 Effect of tillage machinery on straw mulch and ground roughness

机具 Machinery	覆盖的减少率 Coverage decrease (%)	相对地表粗糙度* Relative ground roughness	机具 Machinery	覆盖的减少率 Coverage decrease (%)	相对地表粗糙度* Relative ground roughness
烧秸秆 Burning straw	95	0.0	免耕 No-till	0	0.0
铧式犁翻耕 Run-round plough	90	1.0	浅松 Surface cultivator	26*	0.6
圆盘犁 Disc plough	60	1.0	深松 Subsoiling cultivator	20*	0.2
苗形犁 Driller	35	0.6	播种 Sowing machine	20*	0.4
翼形铲 Aerofoil shovel	20	0.3	圆盘耙 Disc harrow	25*	0.8
鸭掌铲 Duck-foot shovel	17.5	0.7	冬季休闲 Winter fallow	15*	0.0
中耕锄草 Cultivator	10	0.2			

注: * 为作者在山西省测试结果; ** 表示不同机具对地表粗糙度影响的相对强弱程度,取值为 0~1,设免耕对地表粗糙度的影响为 0,翻耕的影响为 1。

Note: * The experiment results in Shanxi Province; ** The relative effect of machinery on ground roughness with the value range of 0~1, in which, 0 represents the effect of no-till and 1 represents the effect of run-round plough.

1.1.3 耕作影响的修正 以耕作后的累积降雨量作为评价耕作对径流影响的指标^[9],有如下关系式:

$$CN_{2t} = CN_{2c} + r \times CN_{2r} \left[\frac{\sum Rain}{R_{rain}} \right],$$

$$\sum Rain < R_{rain} \quad (6)$$

式中, CN_{2t} 为经耕作修正的 CN 值; CN_{2r} 由耕作造成的 CN 的最大减少量; R_{rain} 是消除耕作影响所需的累积总降雨量(mm); $\sum Rain$ 为耕作后的实际累积降雨量(mm); r 为耕作引起的粗糙度的相对变化量。

如图 2, 在耕作之后, CN 减小了 $r \times CN_r$ 个单位; 随后, 降雨做功逐渐消除了耕作的影响, 使 CN 与 R_{rain} 相关的比率增大; 直至 $\sum Rain > R_{rain}$ 时, CN_{2t} 恢复到 CN_{2c} 。

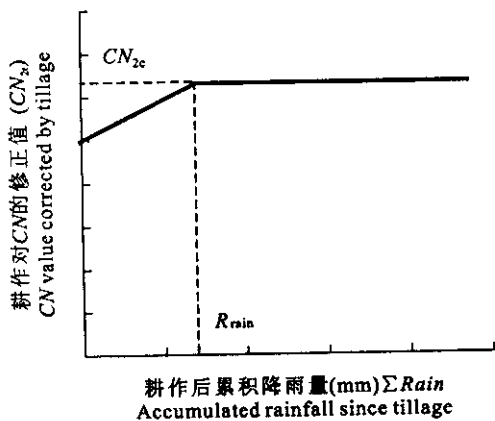


图 2 耕作对 CN_{2t} 的影响示意图

Fig. 2 Sketch map of the effect of tillage on CN_{2t}

1.1.4 土壤含水量的修正 土壤含水量是影响径流的主要因素。随土壤含水量的增大, S 减小, CN 增大, 径流量增大; 当土壤水分达到饱和 SW_{max} 时, S 为 0, 即径流量等于降雨量。有如下关系式:

$$S = S_{max} \left(1.0 - \sum \omega f_i \frac{S w_i}{SW_{max i}} \right) \quad (7)$$

式中, S_{max} 为下垫面持水能力 S 的最大值(即土壤干燥时的 S 值); $S w_i$ 为第 i 层土壤有效含水量(mm); $SW_{max i}$ 为第 i 层土壤饱和含水量(mm); ωf_i 为第 i 层权重指数, 表示在不同土层, 含水量对 CN 的影响程度不同。通过下式, 可使上层土壤水分对地表径流的影响程度较大:

$$\omega f_i = 1.016 \left[e^{-4.16 \frac{d_i}{nd}} - e^{-4.16 \frac{d_{i+1}}{nd}} \right] \quad (8)$$

式中, d_i 为第 i 层底端的深度; nd 为土壤分层数。

$$S_{max} = 254 \left(\frac{100}{CN_1} - 1 \right) \quad (9)$$

CN_1 为土壤干燥条件下的 CN 值, 可用下面的

经验公式计算:

$$CN_1 = -16.91 + 1.348 CN_{2t} - 0.01379 CN_{2t}^2 + 0.00011777 CN_{2t}^3 \quad (10)$$

CN_{2t} 为土壤平均含水量条件下, 坡度 5%, 经过坡度和耕作修正后的 CN 值。

1.1.5 降雨强度的修正 降雨强度对径流的影响可以用降雨对土壤做功多少来表示, 即用降雨能量来表示。本模型中降雨强度对下垫面持水能力 S 的修正式为^[10]:

$$S_{EI} = S \left(\frac{EI_0}{EI} \right)^\lambda \quad (11)$$

式中, EI 为当日降雨能量; EI_0 和 λ 为经验参数, EI_0 为当地正常情况下的日降雨能量, λ 为降雨强度的影响系数, 取值范围为 $0.1 < \lambda < 0.5$ 。当 EI 大于当地的正常降雨能量 EI_0 时, 持水能力 S_{EI} 降低, 产生的径流量大; 相反, 当 EI 小于 EI_0 时, S_{EI} 增大, 径流量减少。

一般用 EI_{30} (E 为降雨总动能, I_{30} 表示 30 min 最大降雨强度) 来表示降雨的侵蚀能力, 并根据降雨量和降雨强度的记录用 Wischmeier 方程计算降雨能量。由于我国一般气象站都没有降雨强度的记录, 本模型建立了一种从降雨量近似计算降雨能量的方法。Bofu Yu^[11] 在分析了大量降雨及降雨强度数据后, 得出降雨能量与降雨量之间近似为幂函数关系, 本课题组在山西省的观测结果证明了这一点。本模型即采用这种幂函数关系来计算日降雨能量:

$$EI_{30} = a P^b \quad (12)$$

式中, P 为降雨量, a , b 为经验参数。

综上, 径流子模型从输入的 CN_{2t} 初值开始, 经过坡度、残茬覆盖、作物覆盖、耕作、土壤含水量、降雨强度等因素的修正, 得出当日的 CN 及 S 值, 最后用式(1)计算当日径流量。

1.2 蒸腾蒸发子模型

蒸发蒸腾计算一般包括潜在蒸散和实际蒸散, 实际蒸散又可以分为土面蒸发和作物蒸腾两部分。本模型在 PERFECT 的基础上增加了潜在蒸散量的计算模块, 然后考虑作物覆盖和残茬覆盖对土壤蒸发和作物蒸腾的影响, 分别计算土壤蒸发量与作物蒸腾量。

1.2.1 潜在蒸散量 Penman 公式和 Priestley-Taylor 公式是最常用的计算潜在蒸散量(ET_p)的模型。Penman 公式机理性比较强, 但它要求输入的风速数据在许多地方都没有记录, 使这种方法的应用受到一定的限制。Priestley-Taylor 公式只要求输入每天的日最高温度、日最低温度、日照时数和太阳辐

射量等气象资料,简单实用,精度较高,应用较多,本模型采用此式。Jones 和 Kiniry^[12]在 Priestley-Taylor 公式基础上,根据平衡蒸发的思想,得出了如下简化计算公式:

$$EEQ = R_s \times (A - B\alpha)(T_a + 29) \quad (13)$$

潜在蒸散量为:

$$ET_p = m EEQ \quad (14)$$

式中, A 和 B 为系数,取 $A = 4.88 \times 10^{-3}$, $B = 4.37 \times 10^{-3}$; R_s 为太阳辐射 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$],由气象数据获得,可用日照时数和纬度近似计算; T_a 为每日加权平均温度,忽略夜间蒸腾作用,有:

$$T_a = 0.6T_{\max} + 0.4T_{\min} \quad (15)$$

m 为温度系数:

$$m = \begin{cases} 0.01e^{[0.18(T_{\max} + 20)]} & T_{\max} < 5\text{ C} \\ 1.1 & 5\text{ C} \leq T_{\max} \leq 35\text{ C} \\ 0.05(T_{\max} - 35) + 1.1 & T_{\max} > 35\text{ C} \end{cases} \quad (16)$$

α 为作物—土壤表面反射率,受土壤种类、地表植被覆盖、土壤水分、大气透明度等因素影响。在模型中,当没有作物生长时,为裸地反射率 α_0 ,取值为 0.10(干燥、有机质含量高、黑色、粘重土壤)到 0.30(砂地),当土壤表面含水量增大时,会略微减小;有作物生长的地面反射率由裸地反射率 α_0 与叶面积指数 (LAI) 算出:

$$\alpha = \begin{cases} 0.23 - (0.23 - \alpha_0)e^{-0.75LAI} & 1 < LAI < 3 \\ 0.23 + (LAI - 4)^2 / 160 & LAI \geq 3 \\ \alpha_0 & LAI < 1 \end{cases} \quad (17)$$

于是潜在蒸散量计算如下:

若日最高温度介于 $5 \sim 35\text{ C}$ 之间:

$$ET_p = 1.1 EEQ \quad (18)$$

若温度高于 35 C :

$$ET_p = EEQ [1.1 + 0.05(T_{\max} - 35)] \quad (19)$$

若温度低于 5 C :

$$ET_p = EEQ \cdot 0.01 e^{0.18(T_{\max} + 20)} \quad (20)$$

1.2.2 土壤蒸发 土壤潜在蒸发 (ET_s) 是在农田潜在蒸散的基础上考虑作物覆盖与残茬覆盖的影响而得。首先考虑作物覆盖的影响:

$$ET_{s1} = ET_p \left(\frac{100.0 - C_{cov}}{100.0} \right) \quad (21)$$

对于保护性耕作,需考虑地表残茬覆盖的影响:

$$ET_s = ET_{s1} e^{-0.22cres} \quad (22)$$

式中, ET_p 为农田潜在蒸散 (mm); ET_{s1} 为经作物覆盖修正后的土壤潜在蒸发量 (mm); ET_s 为经

作物覆盖和残茬覆盖修正后的土壤潜在蒸发量 (mm); $cres$ 为作物残茬覆盖量 (t/hm^2); C_{cov} 为正在生长的作物覆盖率 (%)。

在 ET_s 的基础上进一步计算土壤蒸发量。以降雨时间为起点,分两阶段计算:第一阶段为刚降雨之后,蒸发量为:

$$SE_1 = ET_s; \quad (23)$$

第二阶段蒸发的速率是与降雨后的时间 t 的平方根 \sqrt{t} 线性相关:

$$SE_2 = \text{CONA}(\sqrt{t} - \sqrt{t-1}) \quad (24)$$

CONA 是与气候、土壤条件有关的参数。

1.2.3 作物蒸腾 作物蒸腾量受叶面积指数 (LAI)、土壤含水量及根系分布的影响。潜在作物蒸腾量 ET_c 与叶面积指数 LAI 及潜在蒸散量 ET_p 有关:

$$ET_c = ET_p \left(\frac{LAI}{3} \right), \quad LAI \leq 3$$

$$ET_c = ET_p, \quad LAI > 3 \quad (25)$$

作物蒸腾量在各土层的分配 TR_i 与每层中根系密度及土壤含水量有关:

$$TR = \sum_{i=1}^{ndeps} TR_i \quad (26)$$

$$TR_i = dfac_i \cdot mfcf_i \cdot ET_c \quad (27)$$

式中, TR 为当日蒸腾量 (mm); TR_i 为第 i 层的蒸腾量 (mm); $ndeps$ 为土壤分层数; LAI 为叶面积指数; $dfac_i$ 表示第 i 层土壤中根系分布对蒸腾的影响系数; $mfcf_i$ 为第 i 层土壤含水量 sw_i 与田间持水量 FC_i 的比值,表示土壤含水量对蒸腾的影响:

本模型以 LAI 与累积有效热量单位 (AHU),即积温的关系来划分作物生长阶段(图 3)。

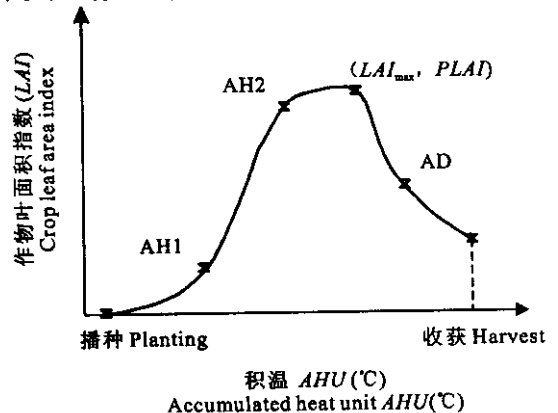


图 3 作物叶面积指数 (LAI) 变化示意图

Fig. 3 Curve of crop leaf area index

LAI 是积温、胁迫指数和作物生长期的函数,在达到最大叶面积指数 (LAI_{\max} , $PLAI$) 之前, LAI 按指数规律增长,生长曲线呈 S 形;之后, LAI 按幂

函数规律下降,直到成熟。根据作物品种特性,输入几个关键点(如播种, AH1, AH2, AD, PLAI, 收获等)对应的 LAI 和积温值,即可决定 LAI 曲线。

1.3 土壤水分再分配子模型

本模型中水分再分配采用理想化的多层“桶式”模型。将每一土层假想为一个有一定容量的“桶”,每一土层的最大含水量为饱和含水量。土壤水分再分配遵循以下原则:(1)当前土层的水分含量达到田间持水量后,过剩的水分(重力水)渗到下一层;(2)在下一层达到田间持水量后仍有过剩水则继续往下渗;(3)这样逐层下渗,下渗的速率由两层之间的土壤导水率决定;若整个土壤剖面达到田间持水量后仍有过剩水,则这些水分均匀分布于整个剖面,直到土壤完全饱和;(4)完全饱和后若仍有过剩水,则这些过剩水继续下渗,构成土壤底层的渗漏损失。

2 模型初步验证

利用本研究组 1998 年至 1999 年在山西省寿阳县旱作春玉米保护性耕作径流及水分测试的结果,对所建立的保护性耕作径流和水分平衡模型进行了检验。

试验中共设 6 种耕作处理。NTCN:免耕覆盖不压实,秋季收获后将秸秆粉碎留在地表,春季免耕播种; NTCC:免耕覆盖压实,收获后秸秆粉碎留在地表,用铁牛-55 拖拉机压实土壤,春季免耕播种; NTNC:免耕不覆盖压实,收获后移走秸秆,用铁牛-55 拖拉机压实,春季免耕播种; STNN:浅松不覆盖不压实,收获后移走秸秆,春季播种前浅松,松土深度 5 cm; STCN:浅松覆盖不压实,收获后将秸秆粉碎留在地表,春季播种前浅松,松土深度 5 cm; CK:传统翻耕,收获后移走秸秆,用铧式犁翻耕并耙地,春季耙地播种。

采用自然降雨径流试验与人工模拟降雨试验相结合的方法。自然降雨径流试验,1998 年干旱少雨且降雨分散,6 月 1 日至 10 月 20 日共降雨 225.3 mm,径流量很小。1999 年 6 月 1 日至 10 月 20 日降雨 274.4 mm,比 1998 年多降雨约 49 mm,降雨比较集中,尤其是 8 月 18 日晚降雨 44.0 mm,瞬时降雨强度达 114.9 mm/h,60 min 最大连续雨量达 38.6 mm,占本次降雨总量的 88%,属于强烈侵蚀暴雨,造成严重的水土流失^[2]。

在自然径流试验区附近类似试验处理的降雨模拟试验,针对不同试验处理、不同耕作方式、不同覆盖量等进行了重复试验,为模型标定和验证提供了大量数据^[3]。共进行了两轮模拟降雨试验,第一次在

1998 年 10 月玉米收获、秸秆粉碎及压实处理后,当时土壤含水率几乎达到凋萎含水率。第二次在 1999 年 7 月,在玉米生长中期,当时土壤水分含量较高,表层 30 cm 的土壤含水率约为田间持水量的 70%。

2.1 模型输入参数

模型要求的输入数据包括:耕作管理措施、气象数据、土壤参数、作物生长参数和模拟的初始土壤含水量^[13]。以 1998 年播种为起点,取实测的土壤含水量为土壤水分模拟的初始值。不同试验处理之间的参数区别主要在于耕作管理措施、土壤水分常数、径流 CN_{2b} 值、模拟开始土壤的初始贮水量等。

2.1.1 耕作管理措施 不同的耕作体系是由一套耕作管理措施构成的,例如播种日期、耕作日期、所用机具、除草方式及残茬处理等。在模型中,这些措施影响了残茬覆盖量、地表粗糙度及土壤含水量等,使 CN 值及水分平衡相应动态变化,因而可根据径流和水分的模拟结果评价不同耕作体系的效应。这是本模型的主要目的,也是本模型有别于一般水分平衡模型的特点之一。

2.1.2 气象数据 气象数据包括逐日降雨量、最高气温、最低气温、蒸发量和太阳辐射。

此处运用经验公式,依据纬度和实测的日照时数进行估算^[14]辐射的数据:

$$R_s = RA(a + b \frac{n}{N}) \quad (28)$$

式中, R_s 为到达地面的太阳总辐射; RA 为天文总辐射量,与地理位置(纬度)及月份有关; N 为天文上可能出现的最大日照时数,由纬度和月份决定; n 为实测的日照时数。经验系数 a 和 b 可根据气象站的 R_s 和 n 的观测资料拟合求出。寿阳县位于北纬 37.3 度,经计算得 $a=0.29142$, $b=0.43676$ 。

2.1.3 土壤参数 包括土壤水分常数、径流曲线数字初值 CN_{2b} 、土壤蒸发参数和土壤反射率。

土壤水分常数包括风干含水量 AD ,凋萎含水量 WP 、田间持水量 FC 、饱和含水量 SAT 和饱和导水率 K_{sat} 等。采用田间实测数据,本试验中各处理的土壤参数是各自不同的。

径流模型中的 4 个重要参数: CN_{2b} 为裸露地表中等含水量条件下的 CN 值,根据 SCS 手册近似查得^[6],可用人工模拟降雨试验来标定其值。本试验中,NTCN 的 CN_{2b} 取值为 77,NTCC 的 CN_{2b} 取值为 85,STCN 的 CN_{2b} 取值为 82,STNN 的 CN_{2b} 取值为 882,NTNC 的 CN_{2b} 取值为 91,传统翻耕 CK 的 CN_{2b} 取值为 87。 CN_{2rc} 表示 100% 覆盖时, CN 的最大减小量,根据人工模拟降雨试验的结果标定;关于耕

作影响的两个参数,采用文献[4]中的推荐值: CN_2 是由于耕作使 CN 减少的最大量,此处取为 5; R_{rain} 是消除耕作影响需要的累积总降雨量,此处取 100 mm。土壤蒸发参数 $CONA$ 和 U 与土壤质地有关,可由田间蒸发量的实测数据计算,如缺乏实测数据,可根据土壤物理性粘粒的含量来估计^[15]。所试土壤物理性粘粒(粒径 <0.01 mm)含量为 14%左右,取值为 3.5 和 7.5。根据常见土壤裸地反射率的推荐值,所试土壤为细砂壤土,土壤裸地反射率 α_0 为 0.15。

2.1.4 作物生长参数 LAI 模型需要输入的关键参数包括:最大叶面积指数 LAI_{max} 及对应的生长积温 $PLAI$,决定 S 曲线形状的两点 $AH1$ 、 $AH2$ 及对应的积温值和作物成熟所需总积温 PHU 。

2.1.5 土壤初始值 包括模拟开始日期各土层的有效贮水量(mm)及地表秸秆覆盖量。如免耕覆盖不压实处理 $NTCN$ 在模拟开始时(1998 年 4 月 10 日)表土层 0~10 cm 内有效贮水量 4.11 mm, 10~30 cm 内有效贮水量 13.01 mm, 30~60 cm 土层内

有效贮水量 27.40 mm, 60~100 cm 土层内有效贮水量 25.97 mm; 模拟开始时秸秆覆盖量为 5 000 kg/hm²。

2.2 地表径流的验证

根据天然降雨径流试验及降雨模拟试验结果,验证径流子模型的模拟效果。检验模型的方法,主要是通过分析模拟值与实测值之间的统计关系,确定二者的相关系数与标准差,前者反映模拟值与实测值之间的一致性,后者反映模型的精度。径流量的模拟值与实测值的统计关系如表 2。各处理的模拟值与实测值之间的相关系数和斜率都接近于 1,说明模拟值与实测值比较接近。

2.3 土壤水分的验证

利用试验中测得的水分数据验证水分平衡模型。各试验处理 100 cm 土层总有效贮水量的预测值与实测值的统计关系如表 3。各处理的水分模拟值与实测值的相关系数在 0.82 以上,标准差在 10 mm 以内,斜率、模拟值与实测值的比值接近于 1,模型对各处理贮水量模拟效果都比较好。

表 2 径流量的模拟值与实测值的关系

Table 2 Statistical relationship between simulated and observed value of runoff

处 理 Treatment	CN	P/O	标准差 (mm) Standard deviaton	线性回归 Linear regression		
				斜率 Slope	截距 Intercept	R^2
STCN	82	1.07	2.58	0.99	0.24	0.86
STNN	88	0.89	3.10	0.94	-0.20	0.89
NTCN	77	0.99	1.68	1.06	-0.18	0.90
NTCC	85	0.99	4.73	0.88	0.77	0.87
CK	87	1.06	2.31	1.00	0.13	0.90
NTNC	91	0.89	3.81	0.82	0.20	0.89

注: P/O 为预测值与实测值的比率。Note: P/O means the ratio of predicted value to observed value.

表 3 各处理的 100 cm 土层贮水量(mm)模拟效果

Table 3 Simulation of soil moisture content at 0~100 cm under different treatments

处 理 Treatment	P/O	标准差 (mm) Standard deviaton	线性回归 Linear regression		
			斜率 Slope	截距 Intercept	R^2
STCN	0.94	10.99	0.98	-2.87	0.82
STNN	0.97	9.64	1.06	-5.65	0.82
NTCN	0.96	6.63	1.06	7.91	0.94
NTCC	0.97	9.95	1.03	4.21	0.83
CK	0.99	9.15	1.11	-7.84	0.85
NTNC	0.96	8.78	1.05	-6.41	0.83

注: P/O 为预测值与实测值的比率。Note: P/O means the ratio of predicted value to observed value.

3 结 语

针对保护性耕作的特点,建立了保护性耕作地表径流与土壤水分平衡模型,以日为步长,根据每天的气象数据、作物生长发育、土壤水分状况及耕作管

理措施,模拟不同保护性耕作体系下地表径流和田间水分平衡随时间变化的规律。

模型对径流曲线数字法进行了改进,较全面地考虑了残茬覆盖、耕作、坡度及降雨强度等因素对地表径流的影响;采用简单实用的 Priestley-Taylor 公

式计算潜在蒸散量,并考虑作物与残茬覆盖对土壤蒸发与作物蒸腾的影响。

依据两年的径流和根层有效贮水量测定数据对模型进行了初步验证,证明模型基本是成功的。如能借助于对地表蒸发、根系、作物等参数进行更精确的实际测定,经过进一步标定和验证后,模型可以分析一定的自然条件下,不同的保护性耕作体系及主要因素对于径流及水分保持的效应,辅助保护性耕作技术的推广应用。

参考文献:

- [1] 高焕文,李洪文,陈君达,等. 可持续机械化旱作农业研究[J]. 干旱地区农业研究,1999,17(1):57-62.
- [2] 王晓燕,高焕文,李洪文,等. 保护性耕作对农田地表径流与土壤水蚀影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2000,16(3):66-69.
- [3] 王晓燕,高焕文,杜兵,等. 保护性耕作的不同因素对降雨入渗的影响[J]. 中国农业大学学报,2001,6(6):42-47.
- [4] Littleboy M, Cogle A L, Smith G D, et al. Soil management and production of alfisols in the semi-arid tropics I modeling the effects of soil management on runoff and erosion[J]. Aust J of Soil Re, 1996, 34: 91-102.
- [5] Littleboy M, Silburn D M, Freebairn D M. PERFECT-a compute simulation model of productivity erosion runoff functions to evaluate conservation techniques[R]. Brisbane, Australia: Queensland Department of Primary Industries, 1989.
- [6] United States Department of Agriculture, Soil Conservation

Service. National engineering handbook, section 4, hydrology [Z]. USA: United States Department of Agriculture, 1972

- [7] Williams J R. EPIC: Erosion/productivity impact calculator I model documentation [A]. USDA ARS. USDA ARS Technical Bulletin Number 1768[C]. USA:USDA ARS.
- [8] Glanville S G, Freebairn D M, Silburn D M. Using curve numbers from simulated rainfall to describe the runoff characteristics of contour bay catchments[A]. Institution of Engineers. Conference on Agriculture Engineering [C]. Bundaberg, Queensland, Australia: Institution of Engineers, 1984. 27-30.
- [9] Freebairn D M, Gupta S C, Onstad C A, et al. Antecedent rainfall and tillage effects upon infiltration[J]. Soil Sci Soc Am J, 1989, 53:1183-1189.
- [10] Yu B, Rosewell C J. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts for south australia [J]. Aust J Soil Res, 1996, 34: 721-33.
- [11] Jones C A, Kiniry J R. CERES-MAIZE a simulation model of maize growth and development[M]. Texas: Texas A & M University Press, 1986.
- [12] 王晓燕. 旱地机械化保护性耕作径流与土壤水平衡模型试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2000.
- [13] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988:194-197.
- [14] Ritchie J T, Crum J. Converting soil survey characterization data into IBSNAT crop model input [A]. International society of soil science. Land qualities in space and time-proceedings of a symposium organized by the international society of soil science[C]. Wageningen, The Netherlands: Pudoc, Wageningen, 1989. 155-168.

A model of runoff and soil water balance under mechanized conservation tillage

WANG Xiao-yan, GAO Huan-wen, LI Hong-wen

(Department of Agricultural Engineering, College of Engineering,
China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on field experiments and PERFECT model, a model of runoff and soil water balance was set up to assess the impacts of conservation tillage practices in dry land areas of Northern China. Supplied with local soil and crop parameters and daily climate data, the model can simulate runoff and soil water balance on daily basis to evaluate different conservation tillage systems and to assess their adaptability to different climate or soil conditions. According to the characteristics of conservation tillage, the procedure of runoff prediction using USDA Curve Numbers was modified in this model by incorporating the effects of residue cover, tillage, field slope and rainfall intensity etc. A simplified Priestley-Taylor equation was employed in the model to calculate potential evapotranspiration, and the effect of residue cover on evapotranspiration was also considered. Preliminary results of model calibration and validation showed that the model explained 80%~90% of the variations in daily runoff and 82%~94% of the variations in soil water content.

Key words: conservation tillage; surface runoff; water balance; model; Curve Number

旱地保护性耕作地表径流和土壤水分平衡模型

作者: [王晓燕](#), [高焕文](#), [李洪文](#)
作者单位: [中国农业大学工学院农业工程系, 北京, 100083](#)
刊名: [干旱地区农业研究](#) **ISTIC** **PKU**
英文刊名: [AGRICULTURAL RESEARCH IN THE ARID AREAS](#)
年, 卷(期): 2003, 21(3)
被引用次数: 16次

参考文献(14条)

1. [高焕文;李洪文;陈君达](#) [可持续机械化旱作农业研究](#)[期刊论文]-[干旱地区农业研究](#) 1999(01)
2. [王晓燕;高焕文;李洪文](#) [保护性耕作对农田地表径流与土壤水蚀影响的试验研究](#)[期刊论文]-[农业工程学报](#) 2000(03)
3. [王晓燕;高焕文;杜兵](#) [保护性耕作的不同因素对降雨入渗的影响](#)[期刊论文]-[中国农业大学学报](#) 2001(06)
4. [Littleboy M;Cogle A L;Smith G D](#) [Soil management and production of alfisols in the semi-arid tropics I modeling the effects of soil management on runoff and erosion](#) 1996
5. [Littleboy M;Silburn D M;Freebairn D M](#) [PERFECT—a compute simulation model of productivity erosion runoff functions to evaluate conservation techniques](#) 1989
6. [United States Department of Agriculture Soil Conservation Service](#) [National engineering handbook, section 4, hydrology](#) 1972
7. [Williams J R](#) [EPIC: Erosion/productivity impact calculator I model documentation](#)
8. [Glanville S G;Freebairn D M;Silburn D M](#) [Using curve numbers from simulated rainfall to describe the runoff characteristics of contour bay catchments](#) 1984
9. [Freebairn D M;Gupta S C;Onstad C A](#) [Antecedent rainfall and tillage effects upon infiltration](#) 1989
10. [Yu B;Rosewell C J](#) [Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts for south australia](#)[外文期刊] 1996
11. [Jones C A;Kiniry J R](#) [CERES-MAIZE a simulation model of maize growth and development](#) 1986
12. [王晓燕](#) [旱地机械化保护性耕作径流与土壤水分平衡模型试验研究](#)[学位论文] 2000
13. [雷志栋;杨诗秀;谢森传](#) [土壤水动力学](#) 1988
14. [Ritchie J T;Crum J](#) [Converting soil survey characterization data into IBSNAT crop model input](#) 1989

本文读者也读过(10条)

1. [孟春雷. 石建辉. Meng Chunlei. Shi Jianhui](#) [土壤蒸发研究及对旱灾防治的意义](#)[期刊论文]-[防灾科技学院学报](#)2007, 9(1)
2. [贺芳芳. 戴怀林. 陈凤喜. HE Fang-Fang. DAI Huai-Lin. CHEN Feng-Xi](#) [上海市郊林带区与非林带区地下水及地表径流变化对比分析](#)[期刊论文]-[中国生态农业学报](#)2008, 16(3)
3. [郝铁蛇. 苏义. 徐斌. HAO Tie-she. SU Yi. XU Bin](#) [库布齐沙漠防风固沙植物蒸腾规律的研究](#)[期刊论文]-[内蒙古林业科技](#)2007, 33(4)
4. [商磊. 赵军. 韩晓增. 张兴义. 宁海龙. SHANG Lei. ZHAO Jun. HAN Xiao-zeng. ZHANG Xing-yi. NING Hai-long](#) [基于田间试验的数学模型预测大豆产量初探](#)[期刊论文]-[农业系统科学与综合研究](#)2008, 24(2)
5. [张德成. 殷鸣放. 陈宏伟. 王炜. 王晓峰. 王毅峰. 丁丽娜. 朱学静](#) [主要森林植被土壤及枯落物水分蒸发量动态研](#)

究[期刊论文]-安徽农业科学2006, 34(10)

6. 张承胤, 代丽, 甄文超. Zhang Chengyin, Dai Li, Zhen Wenchao 玉米秸秆还田对小麦根部病害化感作用的模拟研究[期刊论文]-中国农学通报2007, 23(5)
7. 周青云, 王仰仁. ZHOU Qing-yun, WANG Yang-ren 半干旱区滴头流量对土壤水分变化影响的研究[期刊论文]-天津农学院学报2010, 17(1)
8. 李新举, 张志国, 刘勋岭. LI Xin-ju, ZHANG Zhi-guo, LIU Xun-ling 土壤含盐量对土壤水分蒸发影响的初步研究[期刊论文]-山东农业大学学报(自然科学版) 2000, 31(2)
9. 王志, 王蕾, 刘连友, 郑秋红. WANG Zhi, WANG Lei, LIU Lian-you, ZHENG Qiu-hong 毛乌素沙地沙丘干沙层水分特征初步研究[期刊论文]-干旱区研究2006, 23(1)
10. 易小平, 唐树梅, 余雪标, 漆智平 海南坡地芒果园间作体系水土流失养分损失初步研究[期刊论文]-水土保持学报2004, 18(4)

引证文献(19条)

1. 李治国, 曹学文, 翟金津, 邓健 北京保护性耕作技术示范推广探讨[期刊论文]-农机化研究 2007(9)
2. 曹伟鹏, 吴发启, 雷金银, 赵龙山, 云峰, 于小玲 毛乌素沙地南缘不同耕作措施土壤酶和微生物区系的特征[期刊论文]-干旱地区农业研究 2011(1)
3. 付国占, 王俊忠, 李潮海, 曹鸿鸣, 王振林, 焦念元, 李春霞 华北残茬覆盖不同土壤耕作方式夏玉米生长分析[期刊论文]-干旱地区农业研究 2005(4)
4. 曹伟鹏, 吴发启, 雷金银, 赵龙山, 云峰, 于小玲 毛乌素沙地南缘不同耕作措施土壤酶和微生物区系的特征[期刊论文]-干旱地区农业研究 2011(1)
5. 刘建忠, 师江澜, 雷金银, 高国雄, 吴发启 毛乌素沙地南缘不同免耕农田土壤理化性质及玉米产量差异分析[期刊论文]-干旱地区农业研究 2006(6)
6. 任军, 刘慧涛, 高玉山 半干旱区玉米保护性耕作关键技术研究[期刊论文]-耕作与栽培 2007(3)
7. 李丽霞, 郝明德, 李鹏, 李仲谨 模拟降雨条件下不同材料覆盖对水分入渗特征的影响[期刊论文]-水土保持研究 2004(3)
8. 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 郑洪兵, 李伟堂 东北黑土区发展保护性耕作可行性分析[期刊论文]-吉林农业科学 2008(3)
9. 陈金华, 杨天明, 马晓群, 陈晓芝 安徽省长江以北地区土壤水分动态模拟初探[期刊论文]-中国农业气象 2007(3)
10. 赵海涛, 师帅兵 机械化保护性耕作技术的效益分析[期刊论文]-农机化研究 2006(8)
11. 黄禄星, 黄国勤 保护性耕作及其生态效应研究进展[期刊论文]-江西农业学报 2007(1)
12. 罗锡文, 李就好, 朱余清, 杨洲, 李俊, 黄海琴 耕作方式对砖红壤物理特性和含水率的影响[期刊论文]-农业机械学报 2006(12)
13. 曲婷婷 秸秆覆盖还田的节水效果研究[期刊论文]-吉林师范大学学报(自然科学版) 2013(2)
14. 杜娟 中国北方旱区保护性耕作技术效果及其问题和对策[学位论文]硕士 2005
15. 赵海涛 山西旱地机械化保护性耕作技术效益研究[学位论文]硕士 2005
16. 陈治华 云南红壤旱耕地机械化保护性耕作技术研究[学位论文]硕士 2005
17. 马云祥, 王淑珍 保护性耕作及其配套技术研究进展[期刊论文]-辽宁农业科学 2007(4)
18. 张雯 辽西地区垄作保护性耕作技术体系研究及推广效益评价[学位论文]博士 2005
19. 陈治华 云南红壤旱耕地机械化保护性耕作技术研究[学位论文]硕士 2005

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_ghdqnyyj200303021.aspx