

保护性耕作模式下涝渍胁迫土壤水分运移模型构建与模拟分析

李伊萌¹, 王铮¹, 夏传鹏¹, 崔志英¹, 白忠亮²

1. 长春工程学院水利工程学院 吉林 长春 130012

2. 吉林省水利科学研究院 吉林 长春 130022

DOI: 10.61369/SSSD.2025100022

摘 要： 本研究针对保护性耕作模式下涝渍胁迫对土壤水分运移的影响展开深入探究，以期优化农业种植模式下的土壤水分管理提供理论支持。经过模拟结果显示：在特定降雨强度条件下，秸秆层截留的水分逐渐达到饱和状态后，土壤初始含水率缓慢上升趋势。当土壤逐渐接近饱和状态时，土壤含水率的上升速率可能会受到土壤孔隙结构和水力传导率变化的影响，最终趋向于土壤的饱和含水率。在土壤达到饱和状态之后，土壤水分的运移过程则转变为以饱和流动和蒸发过程为主。当降雨结束时，秸秆层存储的多余水分便会在重力作用和土壤水势梯度的驱动下，发生二次下渗现象。这种二次下渗过程使得原本滞留在秸秆层中的水分得以重新进入土壤，在一定程度上影响了土壤水分的动态平衡和分布格局。

关 键 词： 保护性耕作模式；土壤水运移；涝渍胁迫

Modeling and Simulation Analysis of Soil Water Movement under Waterlogging Stress in Conservation Tillage Systems

Li Yimeng¹, Wang Zheng¹, Xia Chuanpeng¹, Cui Zhiying¹, Bai Zhongliang²

1. School of Hydraulic Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun, Jilin 130012

2. Jilin Institute of Water Resources Research, Changchun, Jilin 130022

Abstract： This study investigates the effects of waterlogging stress on soil water movement under conservation tillage practices, aiming to provide theoretical support for optimizing soil water management in agricultural planting systems. Simulation results show that under specific rainfall intensities, after the straw layer gradually reaches saturation, the initial soil water content increases slowly. As the soil approaches saturation, the rate of increase in soil water content may be influenced by changes in soil pore structure and hydraulic conductivity, eventually tending toward the saturated water content. Once the soil is saturated, the process of soil water movement is dominated by saturated flow and evaporation. After rainfall ends, the excess water stored in the straw layer undergoes secondary infiltration under the combined action of gravity and soil water potential gradients. This secondary infiltration process allows water originally retained in the straw layer to re-enter the soil, affecting the dynamic balance and distribution pattern of soil water to a certain extent.

Keywords： conservation tillage mode; soil water movement; waterlogging stress

引言

与传统耕作方式相比，保护性耕作在多方面展现出显著优势。其一，保护性耕作具有出色的保墒抗旱功能。通过将秸秆均匀地铺散在耕地表面，不仅可以有效减少秸秆焚烧所带来的环境污染，还能在田间形成一层保护性覆盖。其二，免耕措施是保护性耕作的核心特点之一。免耕减少了对土壤的频繁扰动，有利于维持土壤的天然结构和肥力。其三，保护性耕作在减少水土流失方面也发挥着重要作用。均匀铺设的秸秆层能够显著减弱降雨对土壤的直接冲击，增强土壤的抗侵蚀能力。保护性耕作模式在干旱地区起到保墒抗旱的作用，而在黑土地区，由于降雨时段主要集中在夏季，秸秆中残存的水分下降缓慢，使土壤长期保持一个湿润状态，容易造成涝渍灾害，导致农作物减产。本文旨在探究东北黑土区在保护性耕作模式下的土壤水运移模拟，为后续保护性耕作模式下减轻涝渍在灾害，有效增产增效提供理论模型。

一、材料与方法

(一) 研究区域与试验设计

试验区位于长春市城区东南部吉林省灌溉试验中心站，地处中纬度，属温带大陆性气候，四季盛行西南风，其气候特点是：春季干燥多大风，夏季炎热多雨，秋季晴朗温差大，冬季寒冷漫长。根据长春气象站历年资料统计，多年平均年降水量596.3mm。6~9月份年平均降水量466mm，占多年平均年降水总量78%，7~8月降水集中，降水量为313.3mm，占全年降水总量53%。多年平均气温5.1℃，极端最高气温达38℃，极端最低气温达-36.5℃。历年最大冻土深度达1.69m。春季冷暖气团交替出现，西南风加强，多年平均风速4.4m/s，最大风速达31m/s。多年平均最大风速21.05m/s，SW 风向。本区气候偏于干旱，水面蒸发量大于降水量（干旱指数 E/P = 1.5），多年平均水面蒸发量（E-601）为850mm。农业生产用水以天然降水为主。

(二) 数据采集

1. 土壤物理参数数据来源

在保护性耕作区域，采用环刀法 [2] 分层采集1米深土壤（等分为5层，每层20cm，每层3个环刀）。用精度0.01g 电子天平依次称量环刀与土壤鲜重（m1）、饱和含水总重（m2）、烘干后总重（m3）及空环刀重（m0）。通过 $\theta = \frac{m_1 - m_3}{m_3 - m_0} * 100\%$ 算质量含水率；孔隙度 $\theta = n \Rightarrow (1 - \frac{m_3 - m_0}{\rho_s - V} * 100\%$ ，（ ρ_s 取 2.65g/cm3， v 为环刀容积）；干密度 $\rho_d = \frac{m_3 - m_0}{V}$ ，最后计算各层数据平均值与标准差。

其余研究中的土壤物理参数来源于吉林气象站长期的监测数据。其中涵盖了剩余研究所需的关键土壤物理性质指标。采用激光粒度分析仪（Mastersizer 2000）分析土壤颗粒组成。相关土壤物理与参数如下表所示：

土壤物理参数									
土壤物理参数	土壤含水率	土壤比重	土壤干密度	土壤孔隙度	土壤饱和度				
数值	20%	2.7	1.45 g/cm ³	0.862	62.6%				

土壤机械组成及化学参数									
土壤深度 (cm)	砂粒 %	粉粒 %	粘粒 %	石粒 %	有机碳 %	全氮 %	PH	有效磷 mg/kg	速效钾 mg/kg
0-20	29.71	41.22	24.92	4.15	0.55	614	6.43	5.3	178
20-40	31.46	41.95	21.93	4.66	1.03	1030	6.48	3	157
40-60	27.74	34.43	33.48	4.35	0.56	636	6.73	3.2	145
60-80	36.06	32.27	26.57	5.1	0.45	1290	5.54	33.5	253
80-100	29.43	43.66	21.83	5.08	1.14	544	6.15	6	169

(三) 模型构建与方法

1. 土壤水运移模型理论基础（Richards 方程）

模型以非饱和土壤水运动的核心方程——Richards 方程为理论基础，该方程整合了达西定律与质量守恒定律，描述二维垂直平面内土壤水分的时空动态。其数学表达式为：

$$\frac{\alpha \theta}{\alpha t} = \nabla * [K(\theta)(-h + e_z)]$$

式中：

θ 为体积含水率（cm³/cm³），满足 $0 \leq \theta \leq \theta_s$ （ θ_s 为饱和含水率）；

t 为时间（min）；

K(θ) 为非饱和导水率（cm/min），是含水率的非线性函数；

h 为基质势（cm），负号表示相对于大气压的吸力；

e_z 为垂直向下的单位向量，表征重力作用；

$\nabla = (\frac{\alpha}{\alpha_x}, \frac{\alpha}{\alpha_z})$ 为二维梯度算子。

2. Matlab 数值求解方法

网格划分上，水平方向（x）范围 0~20cm，划分为 nx=50

个网格，步长 $\Delta x = \frac{20}{49} \approx 0.408\text{cm}$ ；垂直方向（z）：范围

0~50cm，划分为 nz=50 个网格，步长 $\Delta z = \frac{50}{49} \approx 1.020\text{cm}$ 。空

间导数采用二阶中心差分（例如 $\frac{\alpha^2 \theta}{\alpha x^2} \approx \frac{\theta_{i+1j} - 2\theta_{ij} + \theta_{i-1j}}{\Delta x^2}$ ）；时间导数采用交替方向隐式（ADI）法，将二维问题分解为 x 方向和 z 方向的一维隐式求解，降低计算复杂度，第一步（x 方向隐式求解）：固定 z 层，对每个 j 层求解一维方程，得到中间解 θ^* ；第二步（z 方向隐式求解）：利用中间解 θ^* ，对每个 i 列求解一维方程，得到 t_{k+1} 时刻的解 θ_{k+1} 。每个一维隐式方程对应三对角矩阵，采用 Thomas 算法进行前向消元和回代求解，计算复杂度为 O(n)，适用于大规模网格。

在模拟土壤水运动时，模型的上边界被设置为大气边界，这是因为秸秆覆盖层与空气相接触，降雨入渗和土壤水的蒸发都通过秸秆覆盖层进行。秸秆覆盖使得一定量的水分能够储存在秸秆覆盖层中，只有当秸秆吸收的水分达到一定程度后，降雨才会开始通过土壤自由入渗。

模型左右两侧边界处没有水分的水平运移，因此被设置为零通量边界。试验站所在区域的地下水埋深常年在 3m 以下且具有一定的透水性，所以底部被设置为自由排水边界。

当降雨结束后，覆盖层储存的水量会继续入渗土壤，进入覆盖层增渗量入渗阶段。在此阶段，上边界被设置为变水头边界，直至覆盖层中储存的自由水全部入渗到土壤中为止。覆盖增渗量入渗阶段的历时由覆盖增渗入渗总量控制，左右边界与下边界条件与降雨时相同。

3. 保护性耕作参数的模型嵌入

秸秆覆盖具有独特的截留作用，能够将一定量的水分储存于其内部。只有当秸秆吸收的水分达到饱和程度时，降雨才会继续通过土壤进行自由入渗。同时，秸秆覆盖还能有效减弱土壤的蒸发作用。然而，在降雨充足的情况下，秸秆覆盖所储存的过多水分可能会导致土壤含水率异常升高，抑制植物根部的正常呼吸作用，最终对玉米的产量产生不利影响。有研究表明不同免耕方式相较于传统耕作均可以增加水分在土层中的垂向运移速率，使得水分深入到土层深处当中，可以有效提高雨后土层的平均含水率。^[3]

二、结果与分析

（一）保护性耕作对土壤水运移的影响

不同耕作模式下土壤含水率动态变化

通过 MATLAB 数值模拟可知，在降雨强度为 14.17mm/h 的条件下，受浅层浅茬秸秆覆盖的影响（截留容量有限），经过一段时间后（秸秆覆盖层饱和后），表层 0–5cm 土壤含水率呈现快速上升趋势，4 小时内即达到饱和状态，并启动垂直下渗过程。至 8 小时时，湿润锋推进至 15–25 cm 深度区间，但该深度土层含水率增幅有限，反映出非饱和和导水率随含水率梯度衰减的特性。10 小时后，水分逐步渗入 35cm 深度土层，其含水率上升速率显著低于表层，表明重力驱动下的深层入渗受土壤孔隙结构制约明显。降雨持续 24 小时结束时，45 cm 深度土层含水率仅微增 0.01%，显示出水分在该深度的运移已趋近停滞。降雨终止后，表层土壤因无持续水分补给，秸秆截留水分亦随蒸发和下渗逐渐耗散。随着时间推移，深层土壤含水率通过缓慢渗透逐步回升，至模拟结束时，各土层含水率均趋近初始值。上述动态过程表明，浅层秸秆覆盖对短期强降雨的截留效应有限，其主要作用体现在延缓表层土壤饱和时间（较无覆盖处理延迟约 1.5 小时），但难以显著改变水分垂直运移的整体路径与最终平衡状态。

（二）保护性耕作对土壤水分渗透与持水能力的影响

根据 MATLAB 模拟结果，保护性耕作（浅层浅茬秸秆覆盖）通过物理截留与土壤性质改良显著调控水分运移过程：在 14.17mm/h 降雨强度下，秸秆覆盖使表层（0–5 cm）达到饱和的时间从无覆盖时的约 2.5 小时延迟至 4 小时，降低了地表径流风险；饱和后水分以重力–基质势复合驱动方式下渗，8 小时内湿润锋推进至 25 cm 深度，但该深度含水率仅为饱和值的 30%–40%，表明秸秆覆盖未显著改变土壤孔隙连通性；10 小时后水分渗入 35 cm 深度，而 45cm 深度在 24 小时降雨结束时含水率仅微增 0.01%，说明深层渗透仍以基质流为主。降雨终止后，秸秆覆盖通过削弱蒸发通量和增强土壤颗粒吸附力，使表层土壤含水率从饱和值缓慢下降，降幅较无覆盖处理减少约 30%；同时，因表层（≤20cm）2–5mm 团聚力占比（34%）低于深层（42.3%），形成“浅层高持水、深层快排水”的分层结构，0–35 cm 土层的水分滞留比例提升至 78%（无覆盖为 65%），优化了根系层水分供给。此外，秸秆覆盖使土壤含水率恢复至初始值的时间延长 6–8 小时，增强了土壤对短期干旱的缓冲能力，但对深层渗透的促进作用受限于土壤固有孔隙结构，实际应用中需结合秸秆深翻等措施突破模型中导水率对深度的线性修正局限。

三、讨论

（一）保护性耕作模式调控土壤水运移的机制解析

保护性耕作模式（免耕秸秆覆盖）通过秸秆覆盖层的物理阻隔减少地表径流与棵间蒸发（蒸发系数随覆盖量增加而减小，免耕 100% 秸秆覆盖最小），同时利用完整土壤结构和覆盖微环境促进根系吸水，提高植株蒸腾量（蒸腾系数随覆盖量增加而增大，免耕 100% 秸秆覆盖最大），使日均土壤贮水量在全生育期表现为免耕 100% 秸秆覆盖 > 免耕 70% 秸秆覆盖 > 免耕 30% 秸秆覆盖 >

常规垄作旋耕 > 常规垄作旋耕，形成“抑蒸保水–促根增蒸”的协同机制，稳定水分供给并提升水资源利用效率，其中高覆盖量处理（如免耕 100% 秸秆覆盖）综合效应最优。^[3] 保护性耕作模式（如免耕覆盖）调控土壤水运移机制表现为：大雨时覆盖层初期截留降水使免耕覆盖入渗量较其他处理低 10.63%–18.91%，但 1 小时后因土壤结构增渗效应显著，入渗量反超残茬覆盖、浅松覆盖等处理 8.92%–9.62%，体现“截留–缓释”优化作用；垄沟结构的条带覆盖与残茬覆盖规律相似。小雨时覆盖截留有限，各处理入渗量差异小，仅残茬覆盖、条带覆盖因部分降水滞留覆盖层略低。该模式通过“降雨强度依赖型截留–土壤增渗”耦合机制，动态调节入渗过程，大雨中延缓径流并提升后续入渗效率，小雨中存在短期截留抑制效应。^[4]

（二）保护性耕作对玉米抗涝能力的影响机理

白东星等人的实验结果表明，在 0–60cm 土层土壤含水率在玉米各个时期（除 10–20cm 拔节期）秸秆全量粉碎免耕还田处理均高于秸秆不还田常规耕作处理。^[5] 罗健等人的实验结果表明玉米播种前耕作方式对土壤含水率影响差异不明显，播种后秋深翻秸秆还田方式中土壤含水率更高。^[6] 李翻过等人的实验结果表明秆全量粉碎还田+深翻模式通过增加土壤养分含量和土壤酶活性，增强土壤结构的稳定性，进而改善土壤质量，最终提高玉米产量。^[7] 孙思彤的实验结果表明在秸秆还田方式对玉米根系形态特征和土壤对玉米氮素等影响具有显著影响，且为积极影响。

前人的研究表明，保护性耕作模式将通过影响土壤含水率、土壤养分含量、土壤酶活性、玉米根系形态特征等影响玉米的抗涝能力。而模拟结果也能看出，保护性耕作模式下，土壤蓄水能力更强，更易发生涝渍灾害影响玉米生长，造成减产等不利影响。

四、结论

MATLAB 模拟结果显示，保护性耕作对土壤水运移和玉米生长有显著影响：秸秆覆盖形成的物理屏障，使降雨初期水分入渗量降低，随降雨历时延长，入渗量逐渐增大，不同深度含水率分布呈现表层高、深层逐步渗透补充的特征，且秸秆截留量稳定，维持土壤水分垂直运移的动态平衡，优化水分在土壤剖面的分布。通过调控水分运移，免耕秸秆覆盖处理能稳定生育期土壤贮水量，降低棵间蒸发、提升植株蒸腾，优化水分消耗结构，利于增产。而如果降雨强度超过一定限度，秸秆覆盖的水分入渗将缓慢进入土层中，这将导致土壤含水率中长期保持在一个较高的数值，而过高的含水率将影响玉米根系的呼吸作用，进而影响玉米生长。

参考文献

- [1] 李少昆，王振华，高增贵. 北方春玉米田间种植手册 [M]. 北京：中国农业出版社，2011.
- [2] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京：中国农业出版社，2000.
- [3] 喻浩洋. 保护性耕作对玉米生长及田间土壤水分运移影响研究 [D]. 沈阳农业大学，2024.
- [4] Wang X, Cai D, Hoogmoed W, et al. Developments in conservation tillage in rainfed regions of North China [J]. Soil & Tillage Research, 2006.
- [5] 白东星，陈宣伊，张向前，等. 不同耕作方式对土壤水分动态变化规律及玉米产量的影响 [J]. 华北农学报，2025.
- [6] 罗健，赵莉，李艳，等. 不同耕作方式对玉米生长发育及产量的影响 [J]. 现代农业科技，2025.
- [7] 李翻过，周立萍，周甜，等. 耕作方式与秸秆还田量对土壤质量及玉米产量的影响 [J]. 西南农业学报，2024.