

农田降水渗透深度的影响因素

方文松,刘荣花,朱自玺,马志红

(中国气象局,河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室,河南省气象科学研究所,河南 郑州 450003)

摘要: 根据农田水分平衡原理和溢满渗透理论,利用2006~2009年河南省4个土壤水分自动观测站点的土壤湿度监测资料 and 水分渗透模型,分析了降水渗透深度与影响因子之间的关系。结果表明:降水渗透深度与初始土壤湿度、过程降水量和雨后日数有明显的线性关系,随着三者的增大而渗透深度加深;其中初始土壤湿度影响最大,过程降水量和雨后日数相继其后。土壤性质对渗透深度的影响是:当土壤质地由轻变重,或由砂变粘,则渗透深度由深变浅。

关键词: 渗透;降水;土壤湿度;雨后日数;土壤质地

中图分类号: S152.7⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)04-0185-04

降水是农田水分的主要来源之一,但由于径流、截留、渗漏和蒸发等损失,致使降水量并非全部有效。只有渗透到土壤中作物根系分布层的部分,才能被作物吸取利用,对农作物的生长发育才有实际意义^[1]。因此,降水在土壤中的入渗引起了国内外农业、气象和水利等方面研究人员的广泛关注,部分学者甚至建议,将土壤入渗作为一项战略决策问题来研究^[2]。以往的入渗研究中,降水入渗量的计算和模拟是人们关注的一个焦点,国外已有众多的研究,并建立了一些模型。这些模型基本上可以分为两类,即理论模型和经验模型^[3~5]。本世纪以来,国内学者也开展了较多的入渗研究,降雨入渗补给量和补给系数相继被确定^[6,7],同时,还开展了雨渗比的模拟^[8~10]。目前,农业气象业务服务仅能提供雨情和浅层墒情,缺乏对降雨资料入渗深度情况的分析。河南省地处中原,属于亚热带气候向暖温带气候过渡地区,季风环流特征明显,降水变率大、季节分配不均、旱涝发生较频繁,对农业生产影响较大,特别是春季干旱对冬小麦生产造成严重威胁。因此,本文拟根据农田水分平衡原理和溢满渗透理论,利用2006~2009年河南省4个土壤水分自动观测站点的土壤湿度监测资料,建立降水渗透模型,并分析降水渗透深度与影响因子之间的关系,能够为农田管理、灌溉决策和防旱抗旱措施的制定提供科学依据,为提高为农服务质量提供技术支撑,具有重要的科学和现实意义。

1 资料与方法

1.1 研究区域与资料

根据农业生产实际需求,考虑到河南省不同土壤类型的分布,试验地点分别选择在郑州(砂壤土)、驻马店(粘、壤土)、安阳(壤、粘土)和南阳(壤、粘土)。各站点测量内容主要包括:土壤湿度、土壤容重和田间持水量。气象资料分别来自对应地区的气象台站,土壤湿度采用河南省气象科学研究所和中国电子科技集团公司第27研究所共同研制的Gstar-1土壤水分自动监测仪测定数据。该仪器主要工作原理是根据探测器发出的电磁波在不同介电常数物质中的频率变化,计算出被测物体含水量。其安装深度可根据实际需要调整,本试验监测深度为100 cm,测定层次之间间隔为10 cm。定时自动采集不同层次的土壤湿度数据,时间步长为10 min,从而可获得每次降水过程前后整个土壤剖面完整的土壤湿度资料。

1.2 研究方法 with 模型

1.2.1 重力水渗透模型 本模型首先把土壤分为若干厚度相等的层次 n ,则第 i 层土壤含水量达到饱和需要补充的水量为^[11]:

$$W_{(r)i} = 0.1 h_i \alpha (W_{(fc)i} - W_{(0)i}) \quad (1)$$

式中, $W_{(r)i}$ 为第 i 层需要补充的水量(mm); $W_{(fc)i}$ 为第 i 层田间持水量, $W_{(0)i}$ 为第 i 层初始土壤湿度,二者均为土壤重量含水率(%),在计算时只取其分子;

收稿日期:2010-10-13

基金项目:国家自然科学基金项目(40875071);河南省气象科学技术研究项目(Z200906)和农业科技成果转化资金项目(2008GB24160440)

作者简介:方文松(1968—),男,河南禹州人,高级工程师,主要从事应用气象研究。E-mail: fwsfy@126.com。

万方数据

h_i 为第 i 层土层厚度 (cm), 通常为 10 cm; α 为第 i 层土壤容重 (g/cm^3)。然后, 自上而下将补水量逐层累加, 直至和过程有效降水量基本相等为止, 即:

$$P_e - \sum_{i=1}^n W_{(r)i} = 0 \quad (2)$$

这时过程降水的渗透深度 Z_g 应为:

$$Z_g = 10(n-1) + (P_e - \sum_{i=1}^{n-1} W_{(r)i}) / \Delta_n \quad (3)$$

其中, n 为土壤层次总数, 即 $i = 1, 2, 3, \dots, n$; P_e 为有效降水量 (mm); Δ_n 为第 n 层增湿 1 cm 厚度土层所需要补充的水量 (mm)。

1.2.2 悬着水渗透模型 悬着水渗透的计算方法与重力水基本相似, 第 i 层的水分补充量为:

$$W_{(r)i} = 0.1 h_i \alpha (W_m - W_{(0)i}) \quad (4)$$

式中, W_m 为各层毛管水位势相等时的土壤湿度 (%), 是降水量和初始土壤湿度的函数, 可通过试验得出, 计算时取其分子。则悬着水渗透深度 Z_s 为:

$$Z_s = 10(n-1) + (P_e - \sum_{i=1}^{n-1} W_{(r)i}) / \Delta_n \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 降水与渗透深度的关系

2.1.1 重力水渗透 “满溢渗透”理论认为, 当有降水发生时, 除去植被截留, 有效降水量首先湿润表层, 并使其达到饱和, 然后再逐层向下渗透^[12]。在土壤剖面上, 饱和层以下为增湿层, 其增湿程度向下逐渐变小, 直到为 0, 称之为湿锋。随着越来越多的水分入渗, 饱和层不断向下发展, 湿润层和湿锋也不断下移。通过求算过程有效降水量与当前表层土壤含水量达到饱和所需要补充的水量, 逐层向下推演, 最终确定降水在土壤中的渗透深度。很显然, 该方法主要是针对重力水渗透而言的。利用郑州土壤湿度监测数据, 用重力水渗透模型公式 (3) 进行计算, 得到的降水渗透深度见表 1。结果表明, 降水入渗深度随着降水量和初始土壤湿度的增大而加深, 但由于初始土壤湿度较小, 致使降水量虽大, 入渗深度并不大。

2.1.2 悬着水渗透 实际上, 降水的渗透并不仅仅发生在土壤饱和时。当湿润层的土壤湿度未达到饱和, 但仍大于相邻的下层土壤湿度时, 便会形成水势梯度, 水分将通过毛管作用向下渗透。如此逐层向下渗透, 直到毛管水位势相等时为止, 这时各层土壤湿度达到均一。在悬着水渗透模型公式 (4) 中, 由于 W_m 的确定有一定困难, 所以我们利用 Gstar-1 监测的逐日土壤湿度资料, 逐层、逐日分析土壤湿度的变化。从监测数据上来看, 雨后第一天增湿层主要

集中在表层, 第二天则可达到较深的层次, 且日增量向下逐渐减小, 直至为零。此时, 土壤增湿深度即为渗透深度, 其日数为渗透时间。南阳 2007 年 5 月 30~31 日有一次降水过程, 降水量为 48 mm。表 2 表明, 降水发生当日和雨后第一天, 渗透到 20 cm, 其增量分别为 1.8% 和 2.9%; 第 2、3 天则渗透到 30 cm, 增量分别为 0.1% 和 0.3%; 从第 6 天起直至第 10 天, 渗透到 40 cm, 增量持续稳定在 0.1%; 第 11 天以后增量为零, 40 cm 以下土层增量亦为零。因此, 此次降水的最大渗透深度为 40 cm, 时间为 10 d。

表 1 不同降水过程土壤入渗深度 (郑州)

Table 1 Infiltration depth in soil of different courses of rainfall (Zhengzhou)

降水过程 Course of rainfall (Y-M-d)	降水量 Precipitation (mm)	平均初始湿度 Average of initial soil water content (%)	入渗深度 Infiltration depth (cm)
2007-05-30~05-31	23.9	9.1	12.6
2007-08-30~08-31	39.3	16.2	68.9
2008-06-30~07-01	22.4	4.5	9.4
2009-03-12	11.3	16.1	14.1
2009-04-19	47.9	9.4	26.8
2009-06-27~06-28	41.0	5.4	17.5
2009-08-05	85.7	17.1	100.0
2009-11-11~11-12	45.6	10.3	27.5

2.2 渗透深度的影响因素

渗透是指降水或灌溉水由地表进入土壤中的过程。其入渗量的大小、入渗速度的快慢, 受许多因素的影响。其中最主要的为降水量、初始土壤含水量、土壤性质和植被。

2.2.1 降水量 一次降水过程, 在降水量相近的情况下, 降水强度大, 土壤入渗率小; 降水强度小, 则入渗率大^[13]。而降水强度大, 容易产生地面径流, 造成水分的流失。在一次降水过程历时相近的情况下, 降水量大, 则入渗到土壤中去的水分多; 反之, 则少^[14]。根据郑州、安阳、驻马店、南阳降水资料和渗透深度的计算结果, 入渗深度和降水量之间的关系见图 1。可以看出, 它们之间有着很好的线性关系, 随着降水量的增大, 渗透深度也随之加深。

2.2.2 初始土壤湿度 初始土壤湿度愈大, 入渗率愈小; 反之, 入渗率愈大。较低的初始土壤湿度, 致使基质势梯度较大, 可吸收更多的水分进入土壤, 使其接近饱和。随着时间的延续, 土壤湿度对入渗的影响逐渐变小, 最终可以忽略^[15]。渗透深度与平均初始土壤湿度之间的关系如图 2 所示。

表2 雨后土壤湿度日增量(%)在土壤剖面上的分布(南阳)

Table 2 Distribution of daily increment of soil water content in soil profile after rain (Nanyang)

深度(cm) Depth	雨后天数 Days after rain (d)												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	6.5	5.5	4.6	3.8	3.1	2.5	2.0	1.6	1.1	0.7	0.6	0.4	0.1
20	1.8	2.9	3.1	3.1	3.0	2.8	2.8	2.6	2.3	2.1	2.0	1.8	1.7
30	-0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4
40	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0
50	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1
60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
70	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

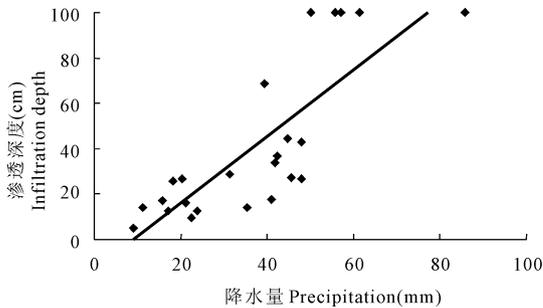


图1 渗透深度与降水量之间的关系

Fig.1 The relationship between infiltration depth and precipitation

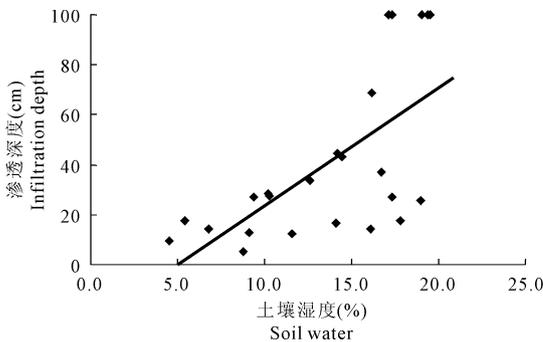


图2 渗透深度与平均初始土壤湿度之间的关系

Fig.2 The relationship between infiltration depth and average of initial soil water content

综合降水量和平均初始土壤湿度对渗透深度的影响,可用下式表示:

$$Z = -40.9592 + 1.2358 P + 3.3933 \bar{W}_0 \quad (6)$$

式中, Z 为渗透深度(cm); P 为降水量(mm); \bar{W}_0 为平均初始土壤湿度(%)。经分析, $F = 61.3110$, $R^2 = 0.8538$, 通过 0.01 的显著性检验。在已知过程降水量和雨前初始土壤湿度的情况下, 式(6) 可用来估算该次降水的渗透深度, 开展墒情和雨情服务。

2.2.3 土壤性质 土壤性质主要包括土壤质地和土壤容重。土壤质地是指土壤颗粒的大小。质地粗, 透水性强, 渗透快; 质地细, 透水性差, 渗透慢^[16]。在相同时间内, 粗砂土、粉土和粉质粘土入渗量依次减小。土壤容重是指在单位体积内, 土壤松紧的程度, 是土壤坚实度和空隙大小的反应。对土壤的透气性、持水性和入渗能力具有较大影响。容重越大, 空隙度越小, 渗透性越差; 容重越小, 空隙度越大, 渗透性越强^[17]。相同时间, 累计入渗量随着土壤容重的增大而减小^[18]。在降水量和初始土壤湿度大致相同的情况下, 不同土壤类型其渗透率有明显的不同。表3 为郑州、安阳、南阳、驻马店不同土壤类型的渗透深度, 砂壤土渗透较深, 偏粘的土壤渗透较浅。

表3 不同土壤类型的渗透深度

Table 3 The infiltration depth of different soil types

地点 Location	降水日期 Rainfall date (Y-M-d)	降水量 Precipitation (mm)	平均初始湿度 Average of initial soil water content (%)	入渗深度 Infiltration depth (cm)	土壤类型 Soil types
郑州 Zhengzhou	2008-08-13	46.3	14.6	58.3	砂壤土 Sandy
安阳 Anyang	2009-07-24	44.9	14.2	44.5	壤、粘土 Loam, clay
南阳 Nanyang	2007-05-30~05-31	48.0	14.5	43.2	壤、粘土 Loam, clay
驻马店 Zhumadian	2008-04-08	42.4	16.7	36.8	粘、壤土 Clay, loam

2.2.4 植被 植被可通过截留降水从而减少降水在土壤中的入渗。特别是在降水量偏小时,该影响更为明显。因此,在研究降水的渗透作用时,务必要扣除植被截留量。对于一定的植被,截留量和降水量之间的关系,一般可分为两个不同的阶段:当降水量比较小时,二者呈线性关系,即截留量随降水量的增大而增大;但当降水量增大到一定程度时,截留量达到最大值,以后则不随降水量而变化^[19]。据研究,一次降水过程的截留量,冬小麦分蘖以前,可以忽略不计;分蘖~拔节为 0.5 mm;拔节~孕穗为 2.8 mm;孕穗~成熟为 4.2 mm;夏玉米中后期为 2.8 mm^[20]。

2.2.5 雨后日数 降水后,水分在土壤中的渗透过程,一般是雨后时间愈长,渗透深度愈深。根据监测资料的模拟结果,渗透深度和有效降水量、平均初始土壤湿度、雨后日数的关系为:

$$Z = -26.6361 + 1.2246P + 1.9211W_0 + 1.0192t \quad (7)$$

其中, Z 为最大渗透深度(cm); P 为降水量(mm); W_0 为平均初始土壤湿度(%); t 为降雨后的日数。经检验, $F = 9.8518$, $R^2 = 0.6786$,通过 0.01 的显著性检验。它们对入渗深度影响明显,但程度有所不同。初始含水量影响最大,降水量次之,雨后日数最小。此外,公式(7)还可估算降水过程在雨后不同时间的渗透深度,以采取有效的应对措施。

3 结 论

降水渗透过程是一个比较复杂的问题,影响因子众多,但在农业生产上十分重要。根据“满溢渗透”理论,利用土壤水分自动监测站连续监测的土壤湿度资料,分析了降水渗透深度与其影响因子之间的关系,取得了比较满意的结果。分析表明,渗透深度与初始土壤湿度、降水量和雨后日数有着十分明显的线性关系,且相关性显著,即渗透深度随着降水量、初始土壤湿度和雨后日数的增大而加大;反之,则减小。不同的土壤质地对渗透深度有很大的影响,土壤质地由轻变重,或由砂变粘,则渗透深度由深变浅。总之,降雨入渗深度为湿土大于干土,大雨大于小雨,砂壤土大于粘壤土,雨后日数愈长,渗透深度愈深。

参 考 文 献:

- [1] 刘昌明.土壤—植物—大气系统水分运行的界面过程研究[J].地理学报,1997,52(4):366—373.
- [2] 朱显谟.再论黄土高原国土整治“28 字方略”[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1995,1(1):4—11.
- [3] Green, W H, Ampt, G A. Studies on soil physics; 1. Flow of air and water through soils[J]. J Agric Sci, 1911, 4(1):1—24.
- [4] Kostiaskov A N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration [R]. Moscow, Russian; Transactions of Sixth Congress of International Society of Soil Science, 1932;17—21.
- [5] Shukla M K, Lal R, Unkefer P. Experimental evaluation of infiltration models for different land use and soil management systems [J]. J. Soil Science, 2003, 168(3):178—191.
- [6] 于 玲.淮北平原区降水入渗补给量的研究[J].地下水, 2001, 23(1):36—38.
- [7] 刘延玺,超伦巴根,马 龙,等.规定时段降雨入渗补给系数的确定[J].内蒙古农业大学学报, 2002, 23(2):44—48.
- [8] 李怀恩,张亚平,蔡 明,等.植被过滤带的定量计算方法[J].生态学报, 2006, 25(1):108—112.
- [9] 阿拉木萨,蒋德明,裴铁璠.科尔沁沙地人工小叶锦鸡儿植被水分入渗动态研究[J].生态学报, 2004, 23(1):56—59.
- [10] 刘立晶,高焕文,李洪文.秸秆覆盖对降雨入渗影响的试验研究[J].中国农业大学学报, 2004, 9(5):12—15.
- [11] 杨文娟,潘云波,孙晓光,等.降水渗透深度的计算方法[J].黑龙江水利科技, 2008, 36(2):61—63.
- [12] 赵同应,朱凌云,卫丽萍,等.旱地土壤水渗透深度预测模型研究[J].干旱地区农业研究, 2006, 24(4):68—71.
- [13] 杨秋珍,李 军,徐 明.农田典型土壤降雨入渗特性研究[J].高原气象, 2008, 27(Suppl):175—182.
- [14] 崔凤铃.降雨入渗若干影响因素研究进展综述[J].西部探矿工程, 2007, (6):84—85.
- [15] 吕 刚,吴祥云.土壤入渗特性影响因素研究综述[J].农业工程学报, 2008, 24(7):494—499.
- [16] 费良军,谭奇林,王文炎,等.充分供水条件下电源入渗特性及其影响因素[J].土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(2):70—74.
- [17] 张永涛,杨吉华,夏江宝,等.石质山地不同条件的土壤入渗特性研究[J].水土保持学报, 2002, 16(4):123—126.
- [18] 李发文,费良军.模空多向交汇入渗特性及其影响因素研究[J].水土保持学报, 2003, 17(4):105—109.
- [19] 何东进,洪 伟.植被截留降水量公式的改进[J].农业系统科学与综合研究, 1999, 15(3):200—202.
- [20] “华北平原作物水分胁迫与干旱研究”课题组.作物水分胁迫与干旱研究[M].郑州:河南科学技术出版社, 1991:161—166.

(英文摘要下转第 207 页)

Effects of different conservation tillage measures on soil fertility , WUE and yield in winter wheat —spring maize rotation field of Weibei Highland

ZHANG Li-hua¹, LI Jun¹, JIA Zhi-kuan¹, LIU Bing-feng¹,

ZHAO Hong-ti¹, SHANG Jin-xia²

(1. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A continuous experiment was conducted in Weibei Highland in 2007~2010 to investigate effects of three soil conservation tillage measures, namely no-tillage (NT), sub-soiling (SS) and deep-ploughing (DP), on soil nutrient, water use efficiency (WUE) and crop yields under the rotation mode of winter wheat → spring maize, combined with balanced fertilization, traditional fertilization and no (or low) fertilization treatments. The results indicated that, the nutrient of loam increased with the implementation of conservation tillage measures; the sequence of the soil organic matter content changed from NT > SS > DP at the beginning of the experiment gradually into SS > NT > DP; and the content of alkali-hydro nitrogen, available P content and available K in surface soil under balanced fertilization condition was in order of NT > SS > DP, and that under conventional fertilization condition and low (no) fertilization condition was SS > NT > DP, while that in SS treatment under both balanced fertilization and conventional fertilization conditions was the highest one of three different tillage treatments in middle of soil; the WUE and crop yields of rotation field were in order of SS > DP > NT in the same fertilization treatment, and that under BSS (balanced fertilization and sub-soiling) treatment combination was the highest one of 9 treatments, BDP (balanced fertilization and deep-ploughing) treatment combination was in the second place. No matter combination with any fertilization treatment of the rotation mode of winter wheat —spring maize, sub-soiling tillage improved the soil nutrient, fertilizer use efficiency, WUE and crop yield significantly.

Keywords: Weibei Highland; conservation tillage; crop rotation; soil nutrient; water use efficiency; yield

(上接第 188 页)

Affecting factors of precipitation infiltration depth in the field

FANG Wen-song, LIU Rong-hua, ZHU Zi-xi, MA Zhi-hong

(Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique, CMA&Henan,

Henan Institute of Meteorological Science, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Based on the theory of water balance in farmland and brimming infiltration, the relationship between precipitation infiltration depth and its impact factor was analyzed by taking use of soil moisture monitoring data from 2006~2009 of four sites of automatic soil water observation stations as well as water infiltration model. The results showed that there existed a linear relationship between infiltration depth and initial soil water content, amount of individual precipitation process, and the days after precipitation, and it increased with the increase of three factors, especially with initial soil water content. Infiltration depth was also affected by soil texture. With soil texture getting heavier or from sandy to clay, the infiltration depth decreased.

Keywords: infiltration; precipitation; soil moisture; time after the rain; soil texture