

The Soil Water Movement Experiment and Simulation in Northern Shaanxi Province*

Defu Dong, Lingmei Huang[#], Bing Shen

Northwest Key Laboratory of Water Resource and Environment Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an
Email: dongdefu-382@163.com, [#]huanglm@xaut.edu.cn

Received: Aug. 11th, 2012; revised: Aug. 26th, 2012; accepted: Sep. 11th, 2012

Abstract: The soil water movement in typical slope of the Mengcha Village, which is located in Mizhi Town, Northern Shaanxi Province, was analyzed by the Hydrus-1D model. The results showed that the straw mulching slope had obvious water-holding effect, and it could control the rain storage as well as the water-holding applying slope. The change rates in different depth of soil moisture were significantly different, shallow soil moisture variation is larger than the deeper. Hydrus-1D can simulate soil water movement effectively in the vertical direction as a prediction way.

Keywords: The Slope in Northern Shaanxi Province; Hydrus-1D; Infiltration; Soil Moisture Redistribution; Moisture Conservation Measure

陕北坡地土壤水分动态试验与模拟研究*

董得福, 黄领梅[#], 沈冰

西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安
Email: dongdefu-382@163.com, [#]huanglm@xaut.edu.cn

收稿日期: 2012年8月11日; 修回日期: 2012年8月26日; 录用日期: 2012年9月11日

摘要: 为分析坡地土壤水分运移规律, 以陕北黄土高原米脂县孟岔村红枣基地典型坡地为研究对象, 应用 Hydrus-1D 模拟了坡地土壤水分运移过程。结果表明, 秸秆覆盖的坡面保水保墒效果明显, 且覆盖秸秆和施保水剂对坡面降雨的调蓄有一定作用。降雨后不同深度土壤水分变化的幅度有明显差异, 浅层水分变化的幅度大于深层。利用软件模拟分析方法能够较合理地模拟土壤水分一维动态变化过程, 可以作为一种预测手段, 对土壤水分动态变化问题的研究有一定的参考价值。

关键词: 陕北坡地; Hydrus-1D; 入渗; 土壤水分再分布; 保墒措施

1. 引言

水土资源短缺和生态环境恶化已成为人类普遍关注的问题, 随着经济社会发展和生存环境破坏, 人们逐渐意识到节水和保护环境的重要性。我国目前农

业灌溉效率仅为 45%, 是发达国家的一半^[1]。黄土高原大部分属于干旱半干旱地区, 降水少而蒸发强烈, 使得土壤水分严重缺失。该地区面临着生态环境持续恶化, 水土流失严重, 沙漠化加剧, 林草植被建设不完善的窘境, 另一方面, 地区缺水使得造林成活率低, 生产力低下。榆林市位于陕西省北部, 属于干旱半干旱大陆性季风气候。近年来, 该地区工业的发展使得农业与城市用水受到不同程度的影响, 即便工业用水

*基金项目: 国家自然科学基金(No. 50939004)。

[#]通讯作者。

作者简介: 董得福(1987-), 男, 青海省西宁市人, 硕士生, 研究方向: 干旱水文与雨洪侵蚀。

量持续增加而农业用水逐年减少, 农业依然是地区的主要用水部门。当地受到地理环境、投入能力和传统观念影响, 农业灌溉依然采用大水漫灌、畦灌等大引大排的粗放型灌溉方式, 用水严重浪费。另外, 灌溉设施配套不齐全, 老化失修, 输灌水过程中跑漏水现象严重, 致使农业用水效率普遍较低^[2,3]。

2. 研究区概况

试验区位于陕西省榆林市米脂县银州镇孟岔村, 米脂县地处陕西省北部, 榆林市中部偏东, 属无定河中游。地理位置东经 109°49'~110°29', 北纬 37°39'~38°50', 东西最大距离 59 km, 南北长 47 km, 面积 1212 km²。海拔最高 1252 m, 最低 843 m, 平均海拔 1049 m, 属于典型的黄土高原丘陵沟壑区。地貌主要以峁、梁、沟为主, 境内山峁达 20,378 个, 沟道 16,120 条, 构成沟壑纵横、梁峁起伏的地貌景观。米脂属中温带半干旱性气候区, 全年降雨量不足, 气候干燥, 冬长夏短, 四季分明, 日照充沛, 春季多风。昼夜温差大, 适宜农作物生长。年平均气温 8.5℃, 极端最高气温 38.2℃, 极端最低气温 -25.5℃, 无霜期 162 天。年平均降雨量 451.5 mm, 集中 7~9 月, 最大年降雨量 704.8 mm, 最小年降雨量 186.1 mm。试验区土壤类型为黄绵土, 容重 1.29~1.38 g/cm³。

3. 材料与方法

3.1. 径流小区

考虑到地形、坡向、土壤、植被和土地利用等, 在研究小区内布设 10 个径流小区。小区宽度均为 3 m。考虑坡长影响因素特别设置 2 个小区的坡长分别为 10 m 和 15 m, 其余小区均为 5 m; 考虑到坡度影响设置 2 个小区坡度分别为 21°和 26°, 剩余坡度均为 16°。此外, 试验还研究表层土壤经不同处理后土壤水分的运动状况, 故将 2 个小区的表层土壤进行施加保水剂和进行秸秆覆盖的处理。

3.2. 试验方法

径流小区四周做防渗处理, 仅在小区底部设置一排水口, 收集坡面产生的径流。为了避免杂草对产流和入渗产生影响, 在试验前需要对其进行清理。模拟降雨前在小区内均匀布设若干雨量筒, 收集雨量。雨

前测量 1 m 深土层含水率垂向变化情况, 每 0.1 m 测量一次。含水率测量在小区内坡上、坡下位置多点进行以提高数据的可靠程度。降雨过程中, 在坡面全部产流之前, 不收集小区产生的径流。待到坡面全部产流, 记录时间, 收集径流。此后间隔 2 min 记录一次累积产流量, 计算 2 min 的径流量, 与上一时段产流对比, 分析变化趋势, 前后时段数据接近说明产流已趋于稳定。模拟降雨历时 30 min, 若最终产流依然不够稳定, 可以适当延长降雨时间, 并分析原因。降雨接受即测量雨量筒收集的雨量, 计算雨强。还需测量雨后 1 h、1 天、3 天、5 天、7 天、15 天、20 天 1 m 土层含水率垂向变化情况, 以获得土层的水分运动状况。另外, 期间若有天然降雨, 则需增加测量次数。试验所需的气象数据通过陕西省黄土高原治理研究所当地设置的气象站获取。

3.3. 模型介绍

土壤水分运移模拟采用 Hydrus-1D 模型^[4], 其可将降水、蒸散发、土壤水分运移等过程进行完整的模拟, 并且能够处理各类的水流边界^[5], 包括定水头和变水头边界、给定流量边界、渗水边界、自由排水边界、大气边界以及排水沟等^[6]。模型土壤水分运动方程为

$$\text{水流控制方程: } \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + \cos \alpha \right) \right] - S(z, t)$$

$$\text{初始条件: } \theta = \theta_0(z) \quad 0 \leq z \leq l \quad t = 0$$

上边界条件(大气边界):

$$\left| K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right| \leq E(t) \quad h_a \leq h \leq 0 \quad z = 0 \quad t > 0$$

$$h = h_a \quad h < h_a \quad z = 0 \quad t > 0$$

下边界条件(自由排水边界):

$$q_n = -K(h) \left(\frac{h_n - h_{n-1}}{\Delta z} + 1 \right) \quad l = 1 \text{ m} \quad t > 0$$

$$\text{时间步长: } \Delta t \leq (5 \sim 7) \cdot \Delta z^2 / D^*$$

式中: $K(h)$ 为非饱和导水率; $S(z, t)$ 为根系吸水率; h 为压力水头; α 为水流方向与垂直方向上夹角, 因坡度而异; $E(t)$ 为最大潜在有效降雨或蒸发速率; l 为评价土层的厚度; h_a 为地表最小的压力水头; h_n 为 1 m 深处的压力水头; Δt 为时间步长; Δz 为空间步长;

D^* 为计算中出现的扩散度的最大值。

4. 结果与分析

4.1. 降雨后 15 天内 1 m 深土层含水率变化过程

土壤含水率可以直接反映土壤的干湿程度, 是表征土壤特性的一个重要参数。在模拟降雨后的 1 天、3 天、5 天、7 天和 15 天, 以及期间天然降雨发生的第二天于各个径流小区不同点分别取土样, 每 0.1 m 取一次, 取至 1 m 深为止。用烘干法测量各土样含水率, 获得结果很好地反映了 1 m 深土层在不同时间的含水率的变化情况。以坡长 5 m, 坡度 16°坡面表层土

壤经不同处理的 3 个小区为例, 如图 1。

由于前期无有效降雨, 且表层土壤蒸发强烈, 该地区地下水埋深很大, 地下水补给可以忽略, 故土壤初始含水率较低且沿垂向逐渐增大。另外, 试验期间天然降雨量都不大, 且雨后的蒸发较为强烈, 所以对土壤水分变化影响并不明显。当地枣树刚刚发芽, 植物的蒸腾作用对含水率的影响也可以忽略。经试验可以看出, 表层土壤进行处理后对保水保墒有一定的影响, 秸秆覆盖和施保水剂的小区雨后 1 天的土壤浅层含水率明显比未处理的小区的高。秸秆覆盖小区土壤含水率的变化相对其他小区比较缓慢且始终保持在

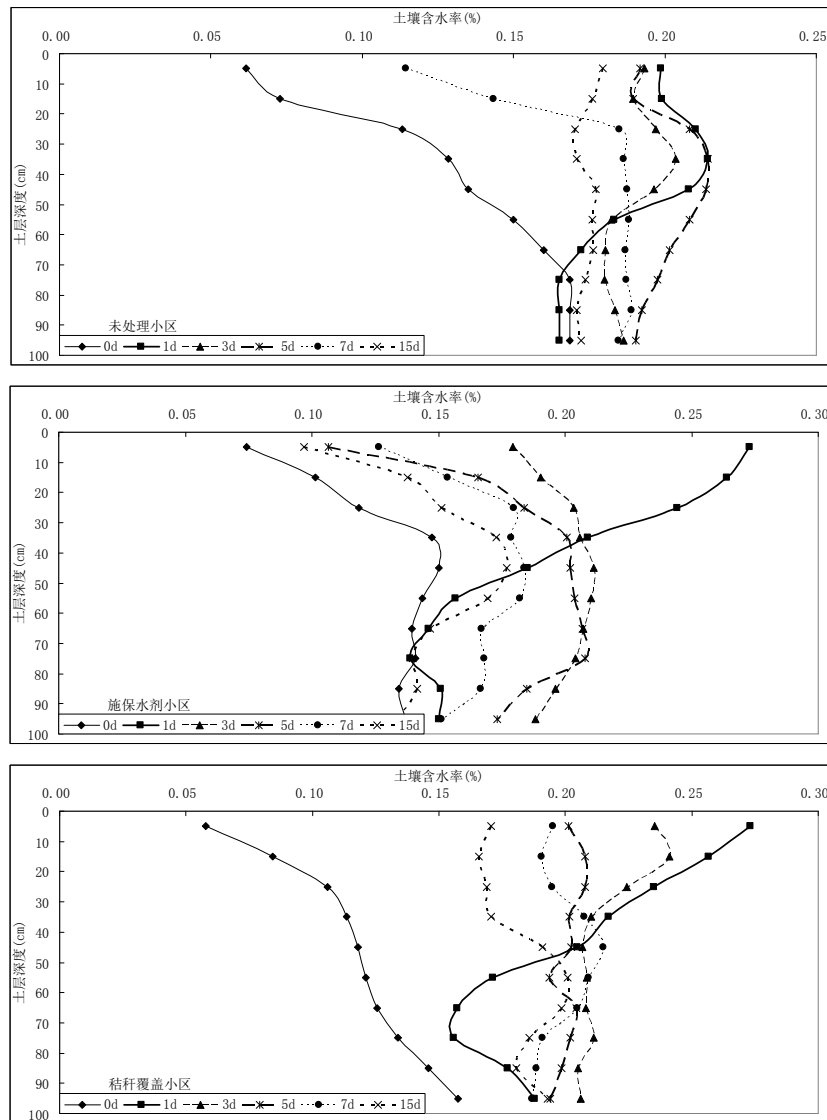


Figure 1. Variation of hydrological variables during 15 days in 5 meters, 16 degrees slope with different treatment
图 1. 坡长 5 m, 坡度 16°坡面表层土壤经不同处理 3 个小区 15 d 内土壤含水率变化对比

较高水平, 在 15 天时仍保持在 17%左右, 可以看出秸秆覆盖对于土壤蓄水保墒的效果较好。施保水剂小区土壤含水率变化异常, 分析可能是在建立小区时选择到了比较土质疏松的土壤, 具体原因有待进一步研究。

4.2. 土壤水分动态模拟与实测结果对比

从图 2 可以看出 Hydrus-1D 模拟全坡面土壤水分动态变化时总的趋势是一致的。模拟与实测过程的初始含水率都设定为雨后 1 小时各点的实测值, 过程为 20 天。模拟和实测图均显示, 随观测点的深度增加土壤含水率的变化趋于平缓。软件的模拟过程中涉及根系吸水项, 但由于相关参数的设定使得根系吸水对土壤含水率变化的影响较小, 这与实测情况基本一致。通过对比可知 Hydrus-1D 的模拟结果具有一定的可靠性, 在缺乏实际资料的情况下可以依靠软件模拟对研究对象进行定性了解, 有助于研究进行。

4.3. 1 m 深土层水量动态变化模拟与实测结果对比

通过烘干法得到单点 1 m 深土层水分的质量, 结合取土钻口的截面面积等参数, 折算出 1 m 深土层所含水量(mm)。各小区均是多点取样, 将同一小区内各点含水量取平均值视为该小区的 1 m 土层含水量。模拟时根据需要输入相应土壤特征参数, 从而获得该参数下的动态模拟结果。以坡长 10 m, 坡度 16°小区 1 m 深土层含水量实测与模拟结果对比为例, 如图 3。

通过 1 m 土层含水量实测值与模拟过程的对比, 并计算二者相对误差, 可以看出依靠 Hydrus-1D 软件对 Soil Water Storage 模拟结果可靠性较好, 该小区二者相对误差最大值只有 7.76%(见表 1)。另外, 针对不同坡度、坡长小区的实测数据和模拟过程的相对误差基本都能控制在 10%以内。在今后的坡地土壤水分动态的研究中, 可以通过已有的相关参数利用

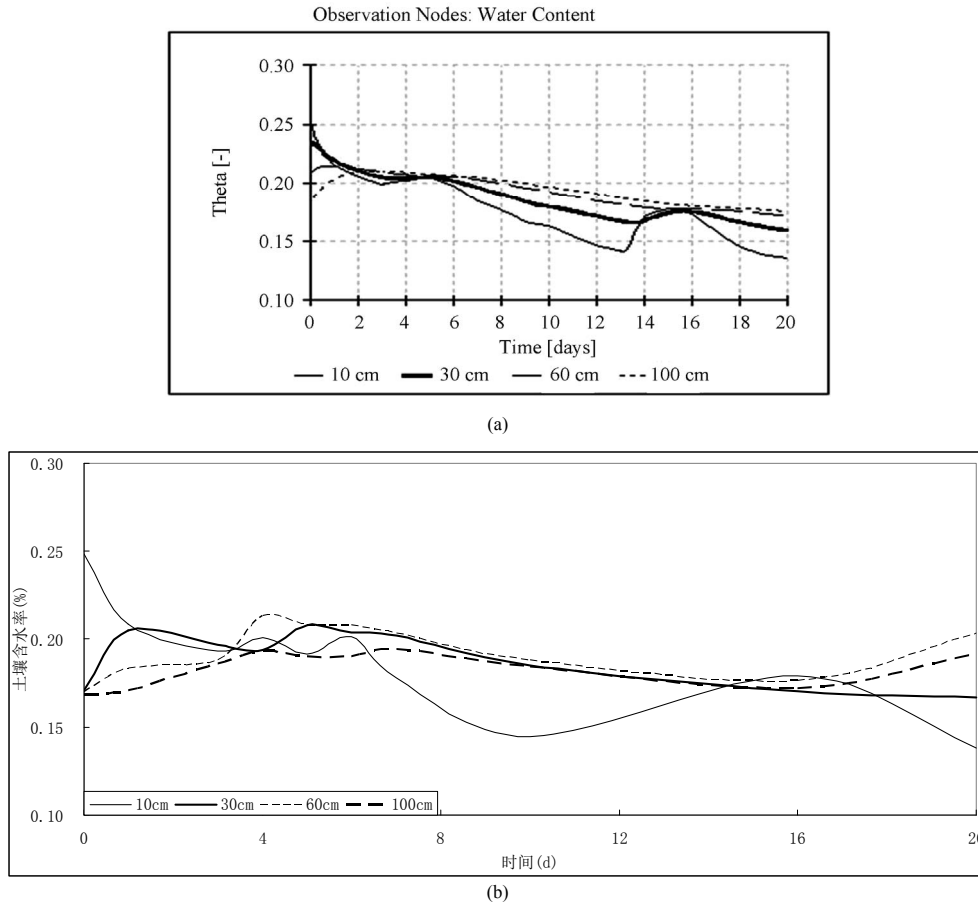


Figure 2. Variation of different depth simulant soil moisture content (a) in comparison with measured value (b) in 5 meters, 16 degrees slope
图 2. 坡长 5 m, 坡度 16°坡面下不同深度土壤含水率动态变化模拟(a)与实测(b)对比

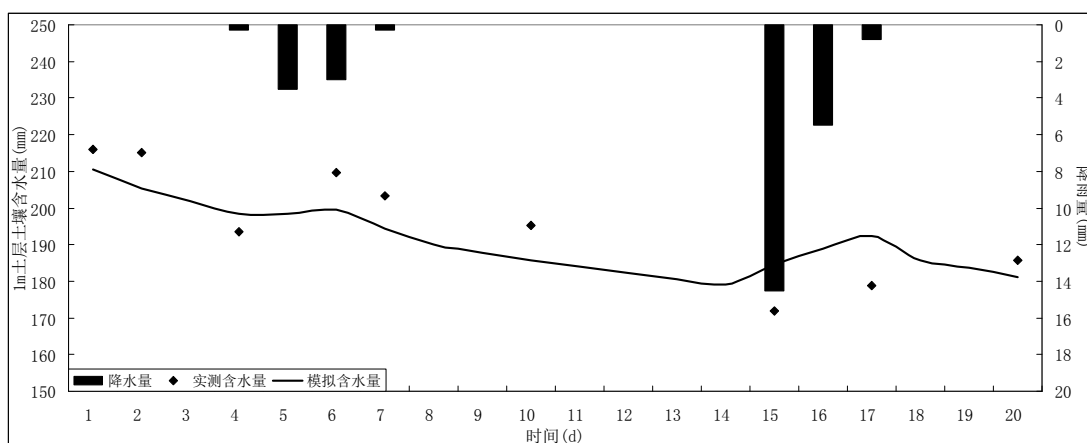


Figure 3. The actual 1 meter soil moisture content comparison with simulation in 10 meters, 16 degrees slope
 图3. 坡度为16°, 10 m 坡长小区 1 m 深土壤含水量实测值与模拟结果的对比

Table 1. The error analysis of soil moisture content
 表1. 土壤含水量模拟与实测结果误差分析表

日期	时间段/天	实测值/mm	模拟值/mm	误差	相对误差(%)
5月12日	1	216.03	210.40	5.63	2.60
5月13日	2	215.03	205.23	9.80	4.56
5月15日	4	193.50	198.32	4.82	2.49
5月17日	6	209.62	199.50	10.12	4.83
5月18日	7	203.44	194.24	9.20	4.52
5月21日	10	195.20	185.74	9.46	4.85
5月26日	15	171.96	184.51	12.55	7.30
5月28日	17	178.74	192.45	13.71	7.67
5月31日	20	185.81	181.13	4.68	2.52

Hydrus-1D 软件对 Soil Water Storage 进行模拟。作为一种预测手段, 模拟结果对土壤水分问题的研究有很重要的参考价值。

4.4. 土壤含水率模拟于实测结果对比

针对不同坡长、坡度的小区, 利用 Hydrus-1D 软件模拟获得的不同时间段土壤含水率垂向变化曲线与实测曲线对比, 整体效果并不理想, 但大致趋势、线形基本能够拟合。图4为坡长5 m, 坡度26°小区1 m 土层含水率垂向分布实测与模拟结果的对比。烘干法计算土壤含水率, 虽然可靠性高, 但仅仅凭借几个测点代替整个小区, 存在着不合理的地方。另外, Hydrus-1D 软件模拟获得的动态过程同样存在偏差, 大致可归纳为两方面: 第一, 模拟时所需参数的设定, 比如土壤分层的设定、初始含水率、 Q_r 、 Q_s 、 α 、 n 、 K_s 、 l 等参数的确定; 第二, 利用 Hydrus-1D 软件

模拟时各分模型选取不能完全符合当地情况, 且软件自身的设计也可能存在不足。因此, 在使用该软件模拟土壤含水率垂向变化时, 获得的结果只具有一定的参考价值, 在利用时要仔细分析其可靠程度。

5. 结论与建议

试验以陕北坡地为研究对象, 通过现场试验、统计分析和数值模拟等方法了解了土壤水分垂向的动态变化, 并利用 Hydrus-1D 软件对土壤水分动态变化进行模拟, 得到以下主要结论: 1) 秸秆覆盖的坡面保水保墒效果非常明显, 且覆盖秸秆和施保水剂对坡面降雨的调蓄也有一定作用。2) 在模拟降雨后, 不同深度土壤水分变化都有减小的趋势, 但由于土壤水运动向深层传递的滞后性和土壤自身的调节作用, 不同深度土壤水分变化的幅度有明显差异, 浅层水分变化的幅度大于深层。3) 利用软件模拟分析方法能够较合

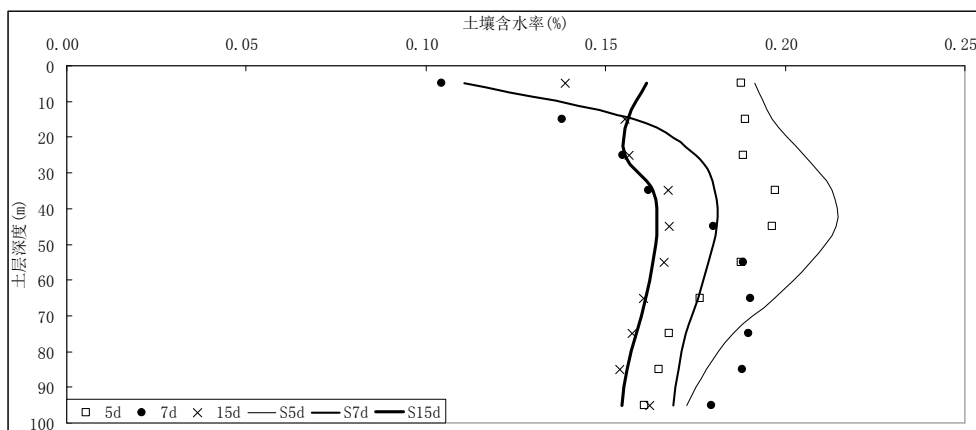


Figure 4. The vertical change of soil moisture content in 5 meters, 26 degrees slope
图4. 坡长5 m 坡度26°小区1 m 深土层含水率垂向变化实测与模拟结果对比

理地模拟土壤水分一维动态变化过程, 可以作为实际中的一种预测手段, 对土壤水分垂向动态变化问题的研究有很重要的参考价值。

在今后坡地土壤水分动态研究中, 可以考虑秸秆和保水剂施加量的差异对土壤水分运动的影响; 对于降雨强度、蒸发强度、土壤初始含水率等因素对坡面入渗的影响, 在 HYDRUS-1D 中都可以模拟研究, 争取将来能够深入开展更多因素对坡面产流入渗过程的研究和探索。

参考文献 (References)

- [1] 雷志栋, 胡和平. 关于提高灌溉水利用率的认识[J]. 中国水利, 1999, 7: 13-14.
LEI Zhidong, HU Heping. Improving the understanding of the utilization of irrigation water. China Water Resources News, 1999, 7: 13-14. (in Chinese)
- [2] 张炜, 杨茂盛. 陕北地区坡耕地特色种植农业的优化研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(23): 14303-14304.
ZHANG Wei, YANG Maosheng. Study on the optimization of characteristic agriculture in slope farmland of Shanbei region. Journal of Anhui Agricultural Science, 2011, 39(23): 14303-14304. (in Chinese)
- [3] 尚爱军, 栾爱梅, 张雄, 等. 陕北荒漠化地区农业持续发展技术体系研究[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(3): 121-123.
SHANG Aijun, LUAN Aimei, ZHANG Xiong, et al. Study on Technology system for agriculture sustainable development in north Shaanxi desertification region. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(3): 121-123. (in Chinese)
- [4] SIMUNEK, J., SEJNA, M., SAITO, H., SAKAI, M. and VAN GENUCHTEN, M. T. The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 4.08, HYDRUS Software Series 3. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, 2008: 330.
- [5] SIMUNEK, J., SEJNA, M. and Van GENUCHTEN, M. T. The Hydrus-1D software package for simulating the one 2-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. US Salinity Laboratory, 1998.
- [6] 马欢, 杨大文, 雷慧闽, 等. Hydrus-1D 模型在田间水循环规律分析中的应用及改进[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 6-12.
MA Huan, YANG Dawen, LEI Huimin, et al. Application and improvement of hydrus-1D model for analyzing water cycle in an agricultural field. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(3): 6-12. (in Chinese)