

Study on Simulating Transient Groundwater Recharge from Precipitation by Using Nash Unit Hydrograph Model*

Yuanyang Huang, Xi Chen

State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing
Email: hydrohy@foxmail.com

Received: Jul. 28th, 2012; revised: Aug. 14th, 2012; accepted: Aug. 26th, 2012

Abstract: Transient groundwater recharge from precipitation was simplified to two successively processes, named water loss and water transfer, with a water balance model and a water transfer model to simulate them respectively. Seven lysimeters packing undisturbed lime concretion black soil without plants kept fix groundwater depth from 0.6 m to 5.0 m was selected, to simulate transient groundwater recharge from precipitation and analysis the variation of the characteristics of the unsaturated zone represented by the unit hydrograph parameters to the groundwater depth. The result indicates, for lime concretion black soil in Wudaogou: the daily groundwater recharge from precipitation can be simulated by the water balance-water transfer model properly; the arrest ability of the unsaturated zone was enhancing with the increasing of groundwater depth; the average delay time of the groundwater recharge was lengthening with the increasing of groundwater depth, mainly effected by the change of arrest ability of the unsaturated zone.

Keywords: Nash Unit Hydrograph Model; Groundwater Recharge from Precipitation; Lime Concretion Black Soil; Lysimeter; Wudaogou

基于 Nash 单位线的降雨入渗补给过程模拟研究*

黄远洋, 陈 喜

河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京
Email: hydrohy@foxmail.com

收稿日期: 2012 年 7 月 28 日; 修回日期: 2012 年 8 月 14 日; 录用日期: 2012 年 8 月 26 日

摘 要: 本文将降雨入渗补给过程概化为扣损和调蓄两个先后过程, 分别用水量平衡法和 Nash 单位线法对扣损过程和调蓄过程进行模拟。选取安徽五道沟大型水文水资源综合实验站 7 个地下水位埋深从 0.6 m 到 5.0 m 的蒸渗仪资料, 进行降雨入渗补给过程模拟, 并分析了单位线参数随地下水位埋深的变化规律。研究结果显示, 对于五道沟无作物砂姜黑土: 基于 Nash 单位线的扣损 - 调蓄模型, 能够较好地模拟的降雨入渗补给日过程; 随着地下水位埋深的增大, 非饱和带的蓄滞能力越强; 非饱和带平均入渗补给滞时随地下水位埋深的增大而增大。

关键词: Nash 单位线; 降雨入渗补给; 砂姜黑土; 蒸渗仪; 五道沟

*基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51079038, 40930635, 51190091), 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目资助(CXLX12_0250)。

作者简介: 黄远洋(1985-), 男, 重庆人, 博士研究生, 研究方向为水文物理规律和预报。

1. 引言

降雨入渗补给地下水过程是大气降水 - 地表水 - 土壤水 - 地下水“四水”转化中重要的环节之一, 降雨入渗补给量是地下水(特别是浅层地下水)的主要补给来源, 是区域水均衡计算中的重要要素。入渗补给系数法^[1,2]是水资源评价时计算降雨入渗补给量的常用方法, 但该方法不能计算降雨入渗补给过程。基于 Richards 方程的数值模拟方法^[3,4], 可以较为细致地描述降雨入渗补给过程, 但该方法在区域尺度上的运用受到计算效率低和参数获取等问题的限制。基于单位线的概念性模型^[5,6]则可以在一定精度内较为高效地模拟降雨入渗补给过程。本文选用代表华北平原典型区域的五道沟蒸渗仪资料, 基于非饱和带水量平衡计算入渗补给量, 基于 Nash 单位线模拟入渗补给过程。

2. 模型结构

降雨进入土壤非饱和带后, 一部分消耗于蒸散发; 另一部分则通过非饱和带调蓄, 最终补给地下水。O'Reilly 将降雨入渗补给过程概化为扣损和调蓄过程后, 提出了一个模型框架^[5]: 分别用水量平衡计算方法和传递函数(即单位线)方法对扣损过程和调蓄过程进行模拟。本文在 O'Reilly 的模型框架下, 对产流过程、蒸散发过程以及瞬时单位线与时段单位线的转换三个方面进行了扩充和调整, 提出如下适合无作物土壤的扣损 - 调蓄模型结构:

1) 扣损模型

受降雨入渗及蒸发作用的影响, 表层土壤动态水分变化剧烈, 其水量平衡可以写为:

$$S^t = S^{t-1} + P^t - E^t \quad (1)$$

式中: S 为土壤蓄水量; P 为降雨量; E 为蒸发量; 上标 t 和 $t-1$ 分别表示当前时段和前一时段。

当蓄水量大于蓄水容量时, 产生有效降雨量 P_r (包括有效入渗量 I 和地表径流量 R_s):

$$P_r = \begin{cases} S^t - S_m & S^t - S_m > 0 \\ 0 & S^t - S_m \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: S_m 为土壤蓄水容量。则有效入渗量 I^t 可按下式计算:

$$I^t = P_r^t - R_s^t \quad (3)$$

对于无作物土壤, 受蒸发作用的土壤含水量变化带蓄水容量采用下式计算:

$$S_m = \int_0^{h_E} [\theta_{fc}(z) - \theta_r(z)] dz \quad (4)$$

式中: θ_{fc} 为田间持水量; θ_r 为残余含水量; h_E 为蒸发作用带厚度, 与土壤特性有关。蒸发作用带蒸发量采用 Ripple 公式计算:

$$E^t = \eta E_{601}^t \left[1 - \left(1 - \frac{S^{t-1} + S^t}{2S_m} \right)^{1/Be} \right] \quad (5)$$

式中: E_{601} 为时段 601 蒸发皿蒸发量; η 为蒸发皿蒸发量转化为蒸发能力的转换系数; $Be \approx 0.6$ ^[7]。

2) 调蓄模型

将非饱和带对有效入渗量的调蓄过程, 视为有效入渗量依次通过多个具有相同线性蓄泄关系的土层调蓄过程, 则瞬时单位有效入渗量补给地下水过程可用 Nash 单位线^[8]模拟:

$$u(t) = \frac{1}{K\Gamma(n)} \left(\frac{t}{K} \right)^{n-1} e^{-t/K} \quad (6)$$

式中: u 为瞬时单位线; n 表征概化土层数; K 为出流系数, 表征土层调蓄能力。

则时段单位有效入渗量补给地下水过程的时段单位线为:

$$U(k) = \int_0^k u(\tau) d\tau - \int_0^{k-1} u(\tau) d\tau \quad (7)$$

式中: U 为时段单位线。

降雨入渗补给地下水的过程则可通过卷积时段有效入渗量和时段单位线进行模拟:

$$R_g^t = \sum_{k=1}^{t-\tau_0} I^{t-\tau_0-k+1} U(k) \quad (8)$$

式中: R_g 为时段入渗补给量; I 为时段有效入渗量; τ_0 为始滞滯时, 即开始产生入渗补给的时段相对有效入渗发生时段的滞时。

3. 实例应用

本文选用安徽五道沟大型水文水资源综合实验站的 7 个蒸渗仪观测资料, 地下水埋深从 0.6 m 到 5.0 m。蒸渗仪面积为 0.3 m², 装填原状砂姜黑土, 表层无作物。利用 1991~1994 年和 1996~1999 年的逐日

降雨量、601 蒸发皿蒸发量以及蒸渗仪的地表径流量和入渗补给量等资料: 1) 推求单位线参数, 分析单位线参数随地下水位埋深的变化规律; 2) 选择其中地下水位埋深为 3 m 的 A18 号蒸渗仪, 采用扣损 - 调蓄模型模拟其降雨入渗补给过程。

3.1. 模型参数推求方法

本文基于次降雨入渗补给过程水量平衡推求调蓄模型参数, 基于长时段水量平衡和土壤特性推求扣损模型参数。

1) 调蓄模型单位线参数推求方法

在 1991~1994 年和 1996~1999 年的逐日数据中, 选取包含入渗补给峰值的次入渗补给过程, 以次入渗补给总量计算误差 LS 最小为目标, 对次入渗补给过程各自进行单位化, 推求单位线参数 n 和 K :

$$LS = \sqrt{\frac{\sum [U(k) - U_{r_g}(k)]^2}{N}} \quad (9)$$

式中: U_{r_g} 为单位化的次入渗补给过程观测值; N 为点距总数。

2) 扣损模型参数推求方法

通过土壤特性实验数据推求参数 S_m 。根据长时段水量平衡, 长时段内的有效入渗总量应为入渗补给总量, 则可建立如下相对水量平衡误差函数:

$$RWB = \frac{|\sum I^t - \sum r_g^t|}{\sum r_g^t} \times 100\% \quad (10)$$

式中: r_g 为时段观测入渗补给量。采用 1991~1994 年和 1996~1999 年的逐日数据, 以使式(10)最小为目标, 推求参数 η 。

3) 调蓄模型入渗补给滞时推求方法

对地下水位埋深为 3 m 的 A18 号蒸渗仪的入渗补给量资料进行分析, 观察到无雨日后的首个降雨日即可发生入渗补给, 因此本文取 A18 号蒸渗仪的始渗滞时 τ_0 为 0。

3.2. 不同地下水位埋深下单位线参数的变化规律

在各种地下水位埋深下, 推求的单位线参数 n 值均小于 1(见表 1)。出流系数 K 表示概化土层的调蓄能

力, K 值越大, 表示调蓄能力越强。出流系数 K 随着地下水位埋深的增大而增大(见表 1), 说明随着地下水位埋深的增大, 非饱和带厚度越大, 其调蓄能力越大。

基于单位线两参数的乘积 nK 是单位线的一阶矩, 表示平均入渗补给滞时, 是入渗补给过程时程长短的一个统计量。 nK 所代表平均入渗补给滞时随地下水位埋深的增大而增大(见表 1), 由于其与 K 变化一致 (Pearson 相关系数为 0.92, 通过 $\alpha = 0.01$ 水平的显著性检验), 说明非饱和带调蓄能力是引起平均入渗补给滞时变化的主要因素。

3.3. 地下水位埋深 3 m 的模型参数及模拟结果分析

地下水位埋深 3 m 的 A18 号蒸渗仪耕作层厚度为 20 cm, 其下部为较为密实的犁底层, 不易产生土壤蒸发, 故取蒸发作用带厚度 h_E 为 20 cm。根据实验结果, 蒸发作用带残余含水率 θ_r 取为 0.11、田间持水率 θ_{fc} 取为 0.38, 由式(4)得到蒸散发作用带蓄水容量 S_m 为 54 mm。进而求得到参数 η 为 0.77, 相应的相对水量平衡误差为 0.13%。

为了合理评价模拟结果, 本文除去明显缺测的和有明显不满足水量平衡的次入渗补给过程, 筛选出共 19 个次入渗补给过程进行评价。本文采用 Nash 效率系数 (NSE) 对过程型态模拟效果进行评价, 采用相对误差 (RE) 对水量平衡模拟效果进行评价:

$$RE = \frac{|\sum_{i=1}^n R_g^i - \sum_{i=1}^n r_g^i|}{\sum_{i=1}^n r_g^i} \times 100\% \quad (11)$$

Table 1. Model parameters and relative measures for different groundwater depths
表 1. 不同地下水位埋深下的模型参数及相关量

埋深 (m)	仪号	n (-)	K (天)	nK (天)	LS (-)
0.6	A6	0.70	0.85	0.60	0.0597
0.8	A8	0.42	1.73	0.73	0.0512
1.0	A10	0.49	1.63	0.80	0.0473
1.5	A12	0.34	2.72	0.93	0.0231
2.0	A14	0.40	2.87	1.16	0.0625
3.0	A18	0.32	3.47	1.12	0.0241
5.0	A20	0.49	5.00	2.46	0.0222

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (r_g^i - R_g^i)^2}{\sum_{i=1}^n (r_g^i - \bar{R}_g)^2} \quad (12)$$

表 2 所示评价结果显示:

1) 将所有次过程视为一个过程的 Nash 效率系数达到 0.83, 表明总体峰值模拟较好, 水量平衡误差为

10.49%, 表明模型总体模拟效果较好;

2) 19 个次过程中: $NSE > 0.6$ 的次过程共有 13 个, 说明模型能较好模拟大多数次过程型态; 水量误差小于 10% 的次过程为 8 个, 说明模型也能较好地模拟大多数次过程水量平衡; 4 个典型的次过程见图 1, 说明模型能较好模拟相当部分次降雨入渗补给过程。

Table 2. Model criteria for different events
表 2. 各次入渗补给过程模型评价指标

次入渗补给过程	RE	NSE	次入渗补给过程	RE	NSE
1991.06.12~1991.06.19	32.88%	0.86	1994.06.05~1994.06.12	49.22%	0.59
1991.06.27~1991.07.16	36.12%	0.13	1994.09.02~1994.09.08	29.41%	0.87
1991.08.31~1991.09.08	27.98%	0.57	1994.10.14~1994.10.19	16.92%	0.42
1992.07.14~1992.07.25	0.14%	0.62	1996.06.22~1996.07.07	0.56%	0.94
1992.08.10~1992.08.17	43.49%	0.21	1996.10.29~1996.11.11	5.25%	0.77
1992.09.04~1992.09.09	9.77%	0.98	1997.06.29~1997.07.23	28.01%	0.90
1992.09.30~1992.10.06	4.47%	0.90	1998.03.07~1998.03.11	14.30%	0.77
1993.06.20~1993.06.28	6.04%	0.96	1999.07.04~1999.07.09	21.05%	0.98
1993.07.15~1993.07.26	0.15%	0.93	1999.10.03~1999.10.19	8.38%	0.61
1993.08.10~1993.08.17	16.30%	0.55	所有次过程视为一个过程	10.49%	0.83

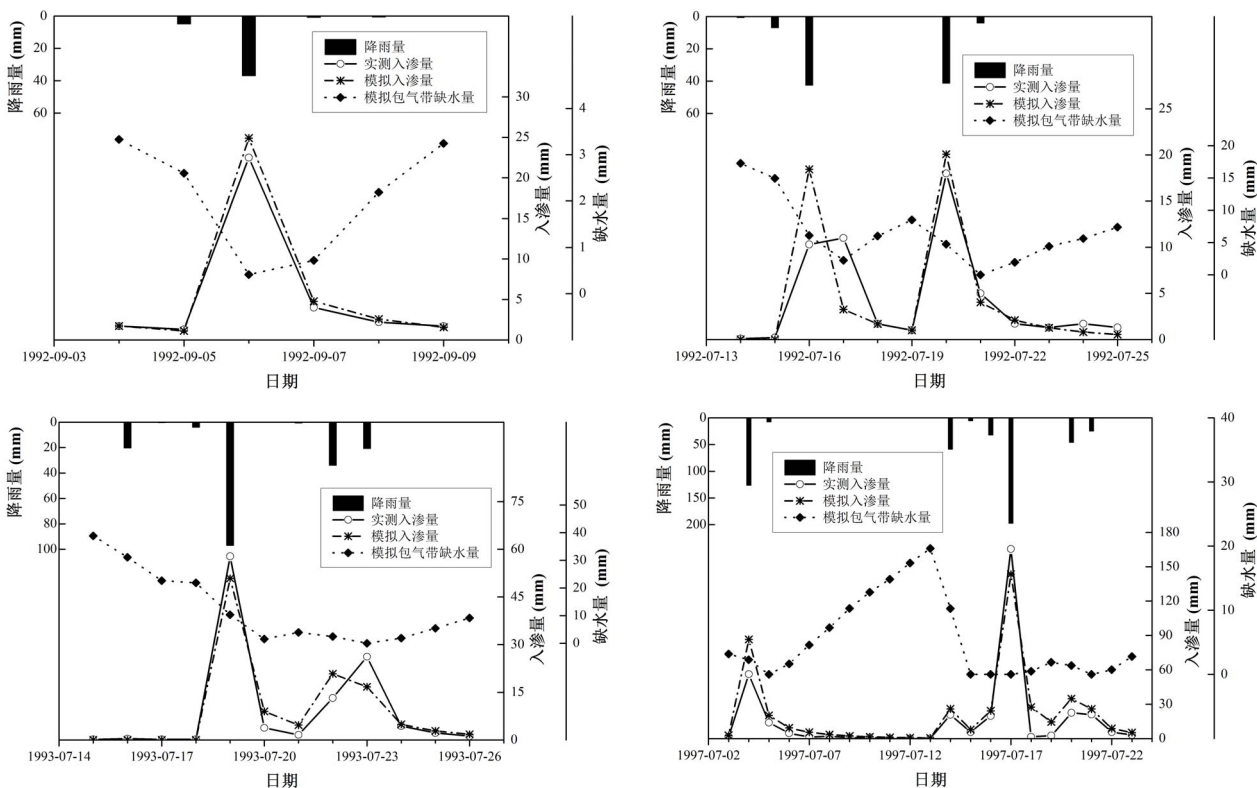


Figure 1. Typical observed and simulated transient groundwater recharge from precipitation events
图 1. 典型的实测与模拟降雨入渗补给过程

4. 结论

选取安徽五道沟大型水文水资源综合实验站 7 个地下水位埋深从 0.6 m 到 5.0 m 的、装填砂姜黑土的、无作物的蒸渗仪作为研究对象, 利用基于 Nash 单位线的扣损 - 调蓄模型进行降雨入渗补给过程模拟, 并分析了单位线参数所反映的非饱和带特性随地下水位埋深的变化规律, 得到以下结论:

1) 基于 Nash 单位线的扣损 - 调蓄模型, 能够较好地模拟蒸渗仪日降雨入渗补给过程, 扣损模型中有效入渗量的计算误差是造成模拟效果差的主要因素;

2) 对于五道沟实验站砂姜黑土, Nash 单位线参数 K 所表征的非饱和带蓄滞能力, 随地下水位埋深的增大而增大;

3) 对于五道沟实验站砂姜黑土, 非饱和带平均入渗补给滞时随地下水位埋深的增大而增大, 蓄滞能力是引起其变化的主要影响因素。

参考文献 (References)

[1] 金光炎, 汪家权, 郑三元, 等. 地下水计算参数的测定与估计 [J]. 水科学进展, 1997, 1: 19-27.

- JIN Guangyan, WANG Jiaquan, ZHEN Sanyuan, et al. The measurement and estimation of groundwater parameters. *Advances in Water Science*, 1997, 1: 19-27. (in Chinese)
- [2] 史良胜, 蔡树英, 杨金忠. 次降雨入渗补给系数空间变异性研究及模拟[J]. 水利学报, 2007, 1: 79-85.
SHI Liangsheng, CAI Shuying and YANG Jinzhong. Study on spatial variability of sub-rainfall infiltration coefficient and simulation of the stochastic field. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 1: 79-85. (in Chinese)
- [3] THOMS, R. B., JOHNSON, R. L. and HEALY, R. W. User's guide to the Variably Saturated Flow (VSF) Process for MODFLOW: US Geological Survey Techniques and Methods 6-A18. Reston, Virginia, 2006.
- [4] THERRIEN, R., MCLAREN, R. G., SUDICKY, E. A., et al. HydroGeoSphere: A three dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport. Groundwater Simulations Group, 2012.
- [5] O'EILLY, A. M. A method for simulating transient ground-water recharge in deep water-table settings in central Florida by using a simple water-balance/transfer-function model. US Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5195. Altamonte Springs, 2004.
- [6] WU, J., ZHANG, R. and YANG, J. Estimating infiltration recharge using a response function model. *Journal of Hydrology*, 1997, 198(1-4): 124-139.
- [7] RIPPLE, C. D., RUBIN, J. and VAN HYLCKAMA, T. E. A. Estimating steady-state evaporation rates from bare soils under conditions of high water table. US Geological Survey, Water-Supply Paper 2019-A. Washington DC: US Geological Survey, 1972.
- [8] NASH, J. E. The form of the instantaneous unit hydrograph. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1957, 3(3): 114-118.