

# 短时强降雨下平原区域浅层地下水入渗补给规律研究

肖航, 燕青, 李洋, 魏楠

(河南省水文水资源局, 河南 郑州 450003)

**摘要:**以豫东平原惠北试验区为研究区域,根据研究区域包气带土壤蓄水库容、土壤前期含水量、地表径流、潜水蒸发量等资料数据计算地下水入渗补给规律,确定降雨对地下水的补给系数。研究结果显示:单次短时强降雨条件下,降雨强度与研究区域浅层地下水入渗补给系数呈反比例关系;当降雨强度一致时降雨量与研究区域浅层地下水入渗补给系数呈正比例关系,在降雨强度低于15 mm/h的条件下,降雨量主要用于补充包气带缺失的水分和土壤、作物、植物等的蒸发蒸腾消耗,无法对研究区域浅层地下水进行有效补给。

**关键词:** 短时强降雨; 浅层地下水; 入渗补给; 补给系数; 平原区域

中图分类号: X523

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2021)06-0024-05

## Study on Recharge Law of Shallow Groundwater Infiltration in Plain Area under Short-term Heavy Rainfall

XIAO Hang, YAN Qing, LI Yang, WEI Nan

(Bureau of Hydrology and Water Resources in Henan Province, Zhengzhou, Henan 450003, China)

**Abstract:** Taking Huibei experimental area of East Henan Plain as the research area, the recharge law of groundwater infiltration was calculated according to the data of soil moisture storage capacity in the aeration zone, antecedent soil moisture content, surface runoff and phreatic evaporation, and the recharge coefficient of rainfall to groundwater was determined. The results showed that under the condition of single short-term heavy rainfall, the rainfall intensity was inversely proportional to the recharge coefficient of shallow groundwater in the study area. When the rainfall intensity was consistent, the rainfall intensity was positively proportional to the recharge coefficient of shallow groundwater in the study area. When the rainfall intensity was below 15 mm/h, the rainfall mainly supplemented the water lost in the aeration zone and the evapotranspiration of soil, crops and plants, which could not effectively recharge the shallow groundwater inflow in the study area.

**Key words:** Short-term heavy rainfall; Shallow groundwater; Infiltration recharge; Recharge coefficient; Plain area

平原区域浅层地下水补给的主要来源是降雨,降雨入渗补给是指在重力作用影响下<sup>[1-2]</sup>,大气降水后部分雨水通过地表与地下水间的土壤渗透补给。降雨入渗补给量主要受降雨强度、土壤蓄水库容量和地下水位埋深等环境因素影响<sup>[3]</sup>,同时还受降雨时长、降雨前期土壤含水量等因素影响。降雨对地下水的入渗补给不仅是区域水量均衡判断的关键指标之一,而且是浅层地下水动态预测与地下水资源评估的主要指标。因此,研究降雨入渗对地下水的补给规律具有理论与实际双重意义<sup>[4]</sup>。

短时强降雨的主要特征体现为雨量大、排泄快、对浅层地下水补给时间短。在相关地下水入渗补给研究中,王玉伟等<sup>[5]</sup>利用人工示踪法分析了位山灌区地下水补给特征,该方法采用溴离子作为示踪剂,通过综合补给系数和克里格空间插值法区

收稿日期:2020-11-20;修订日期:2021-09-30

基金项目:河南省水利科技攻关“短时强降雨对豫东平原区浅层地下水时空演化影响研究与应用”基金资助项目(GG201921)

作者简介:肖航(1977—),男,江西南城人,高级工程师,学士,主要从事水文水资源和地下水监测工作。

分了不同的降雨类型,并结合灌溉补给强度得出地下水位与综合入渗补给系数之间的关系;Li 等<sup>[6]</sup>采用水平衡法和可变饱和带二维数值模拟计算降雨入渗补给系数、供水量和蒸发量,并利用 Visual MODFLOW 模拟地下水流作参数敏感性分析,确定园林地下水位变化的主要影响因素。然而,上述两种方法的计算过程较为复杂,为了进一步简化地下水补给特征计算过程,今提出短时强降雨下平原区域浅层地下水入渗补给规律研究方法,以豫东平原为研究区域分析短时强降雨入渗补给规律,为研究区域地下水科学开发与利用提供数据参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

豫东平原是河南省内面积最大的平原,其面积占河南省总面积的 44% 左右。该平原地势较为平坦,东部和北部以河南省省界为边界,西部以太行山和伏牛山山脉东缘为边界,东西宽约 180 km,南北长约 500 km。为提升河南省农作物生产能力,河南省自然资源部门将豫东平原作为高标准基本农田整治的重点区域,在该平原新增近 16 666 hm<sup>2</sup> 耕地,该项目实施后,豫东平原耕地每亩农作物产量提升 100 kg 左右。今选择豫东平原内的惠北试验区为研究对象,研究短时强降雨下平原区域浅层地下水入渗补给规律。惠北试验区位于淮河水系惠济河流域,地形平坦,试验区内土壤多为细砂壤土,地下水埋深低于 5 m,在忽略补源的情况下,降雨入渗成为试验区浅层地下水资源补给的唯一来源。试验区内设有兴隆和八里湾两个雨量站,对地下水位实施逐日观测。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 包气带土壤蓄水库容分析

包气带主要是指潜水面与地表间的蓄水空间,其主要功能与水库和湖泊相似,用于水资源的存储与调节。包气带岩性、降雨特性、土壤前期含水量和潜水埋深等因素是影响包气带对水分调节功能的主要因素。包气带空间内的蓄水量被定义为总库容,由有效库容、死库容和重力水库容共同组成<sup>[7]</sup>。下渗过程中水分分布带如图 1 所示。

植物和作物生长过程中可以吸收的土壤水部分即为包气带总库容内的有效库容;植物和作物生长过程中土壤对其供水,减少令其凋萎时土壤内含水量分布曲线所围的单位面积即为包气带总库容

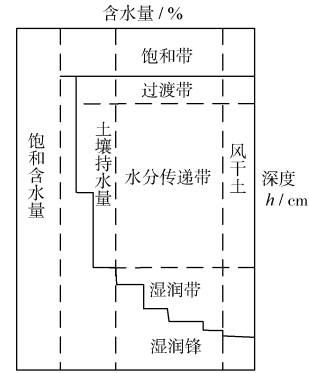


图 1 下渗过程中水分分布带

Fig. 1 Water distribution zone during infiltration

内的死库容;重力水库容作为总库容的重要组成部分,是指区域土壤饱和含水量同土壤田间持水量曲线间的单位面积,其表达式为:

$$W_w = \theta_w \times x - (\theta \times x + z \times \theta_0) \quad (1)$$

式中:  $W_w$  为重力水库容, mm;  $\theta_w$  为土壤饱和含水量, %;  $x$  为地下水埋深, mm;  $\theta$  为毛细水上升带土壤含水量, %;  $\theta_0$  为土壤田间持水量, %;  $z$  为毛细水上升高度, mm。

当包气带可容纳库容被降雨入渗补给量填满后,多余降雨量无法继续入渗,基于此可将包气带库容作为平原区域浅层地下水入渗补给量的上限值<sup>[8]</sup>。地下水埋深与包气带重力水库容量之间呈正比例关系(见图 2),即地下水埋深越小,包气带重力水库容量越小。

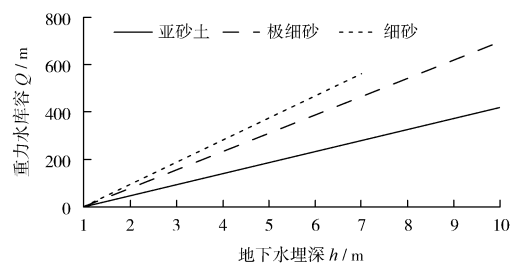


图 2 重力水库容与地下水埋深的关系

Fig. 2 Relationship between gravity water storage capacity and groundwater depth

#### 1.2.2 土壤前期含水量计算

包气带总库容的含水量是影响平原区降雨地表产流与浅层地下水位上升的主要因素,前期影响雨量即降雨开始前包气带剖面土壤含水量<sup>[9]</sup>。根据研究区域前期降雨资料可以计算出前期影响雨量,计算公式为:

$$P_{a,t} = D \sum_{i=1}^m z_{t,i} (P_{t,i} - R_{t,i}) \quad (2)$$

式中:  $P_{a,t}$  为  $t$  次降雨的前期影响雨量, mm;  $z_{t,i}$  为前  $i$  次降雨距计算  $t$  次降雨的天数, d, 在  $z \geq 15$  的条件下, 可定义前  $i$  次降雨对计算  $t$  次降雨开始时的土壤含水量无影响;  $P_{t,i}$  为  $t$  次降雨前第  $i$  次降雨量, mm;  $R_{t,i}$  为  $t$  次降雨前的第  $i$  次降雨径流量, mm;  $m$  为  $t$  次降雨前的降雨次数;  $D$  为折减系数, 通常为定值, 取值范围为  $[0.85, 0.95]$ 。

### 1.2.3 地表径流量确定

降雨量、降雨强度和降雨时长是影响地表径流大小的主要因素<sup>[10]</sup>。在降雨量大、降雨强度较高且降雨时长较长的条件下, 地下水上升至地面, 多余的降雨量无法下渗至包气带内, 出现地表产流排入河道泄出区外。短时强降雨条件下, 在研究降雨入渗对平原区域浅层地下水入渗补给过程中须排除这部分降雨量, 由此得到研究区域内短时强降雨条件下降雨与径流的经验关系表达式为:

$$R = -20.8 + 0.337 \times (P + P_a) + 1.611 \times 10^{-4} \times (P + P_a)^2 \quad (3)$$

式中:  $R$  为单次降雨造成的地表径流量, mm;  $P$  为单次降雨量, mm;  $P_a$  为单次降雨的前期影响雨量, mm。

根据式(3)得到, 在  $P + P_a = 60$  条件下  $R = 0$ , 即在该条件下研究区域不会产生地表径流。

### 1.2.4 潜水蒸发量计算

研究区域潜水蒸发量由土壤蒸发量和植物、作物蒸发量两部分组成<sup>[11]</sup>。参考文献[11]中的Penman-Monteith公式可确定作物蒸发量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 地下水入渗补给规律研究

#### 2.1.1 土壤入渗阶段性

通过分析研究区域地下水入渗相关资料得出, 在短时强降雨条件下, 研究区域降水的土壤入渗过程可概括为3个阶段<sup>[12]</sup>: 初渗阶段、不稳定入渗阶段和稳定入渗阶段。

(1) 初渗阶段。降雨全部入渗, 通常不会形成地表径流, 在此阶段, 可定义入渗率与降雨强度一致<sup>[13]</sup>。试验结果显示, 研究区域耕作水平越高, 此阶段的滞时性越强, 在短时强降雨的条件下, 有一定概率形成局部超渗产流, 同时有一定概率产生大块区域的局部暂时积水问题。

(2) 不稳定入渗阶段。研究区域内短时降雨条件下, 降雨与地面接触后大部分降雨下渗土壤, 剩余雨水产流随着降雨时间的延长逐渐扩大构成地表径流<sup>[14]</sup>。在该阶段入渗量和降雨量一部分渗入试验区土壤包气带内, 剩余部分形成重力水向土壤深层下渗, 补给浅层地下水。短时强降雨条件下, 当降水量超过土壤次吸水量、地面地物截留及地下入渗量时, 逐渐形成地表径流。此阶段入渗强度随降雨时长的提升而逐渐下降。

(3) 稳定入渗阶段。在入渗强度与降雨强度、入渗量与降雨量之间满足相对均衡的条件下, 随着短时强降雨时长的持续提升, 入渗率保持相对稳定, 研究区域地表径流在恒定强度下维持常量。

根据研究区域不同场地的降雨入渗资料, 得到研究区域短时强降雨条件下的入渗曲线<sup>[15]</sup>, 根据入渗曲线能够得到研究区域内初渗阶段和稳定入渗阶段曲线平行于时间横轴, 其值为恒量, 第二个阶段的入渗强度可用式(4)描述:

$$F = f(t) \quad (4)$$

式中:  $F$  为降雨入渗强度, mm/min;  $f$  为降雨入渗率, mm/min;  $t$  为降雨时长, min。

式(4)满足幂函数关系, 由此得到相应降雨环境下不稳定入渗总量, 表达式为:

$$\sum F = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} t^{-0.915} dt \quad (5)$$

将式(5)计算结果与初渗总量及稳定入渗阶段总量相加, 即可确定短时强降雨条件下研究区域的入渗总量。将入渗总量与土壤降雨蓄水量相减, 即可得到研究区域浅层地下水补给量。

#### 2.1.2 入渗率与降雨强度的关系

在短时强降雨条件下, 随着降雨强度的提升, 降雨入渗率均值也有所提升<sup>[16]</sup>。在降雨强度  $> 3.0$  mm/min 时, 降雨强度的提升不再令人渗率提升, 此时, 入渗率稳定在  $(0.75 \pm 0.05)$  mm/min 左右。由相关分析得到, 在降雨强度  $< 1.70$  mm/min 时, 入渗率随降雨强度的提升而快速上升; 在降雨强度  $\geq 1.70$  mm/min 时, 入渗率随降雨强度的提升小幅上升, 两者间的关系分别见式(6)和式(7)。

$$f = 0.39i - 0.21, 0.22 \leq i < 1.70 \quad (6)$$

$$f = 0.24i + 0.39, 1.70 \leq i \leq 3.00 \quad (7)$$

式中:  $f$  为降雨入渗率, mm/min;  $i$  为降雨强度, mm/min。

#### 2.1.3 降雨对地下水的补给系数

通过试验能够确定研究区域短时强降雨条件下浅层地下水入渗补给系数<sup>[17]</sup>。次降雨对试验区浅层地下水的补给系数  $F_g$  可通过式(8)描述:

$$F_g = F - (W_w - P_{a,t}) - Z_g \quad (8)$$

式中:  $W_w$  为重力水库容, mm;  $P_{a,t}$  为前期影响雨量, mm;  $F$  为复蓄系数;  $Z_g$  为潜水蒸发量, mm。

在短时强降雨条件下, 潜水蒸发量在短时间内较小, 在水平衡中可忽略, 故可将式(8)优化为:

$$F_g = F - \Delta_p \sigma \frac{v}{10} \quad (9)$$

式中:  $\Delta_p = W_w - P_{a,t}$ ;  $\sigma$  为土壤容重,  $g/cm^3$ ;  $v$  为地表至毛细水活动深度, cm。

### 2.2 降雨量变化对入渗补给的影响

根据 1970—2020 年研究地区的气象资料显示, 该区域降雨量范围为 273.8 mm ~ 945.6 mm, 降雨量平均值与变差系数分别为 525 mm 和 0.29。依照降序排列近 50 年研究区域年降雨量及其累计频率, 见图 3。根据图 3 计算得出研究区域不同降水年型对应的降雨量和入渗补给量, 见表 1。由表 1 可知, 研究区域内浅层地下水入渗补给量与降雨量呈正比例关系, 即年降雨量越大, 其浅层地下水入渗补给量也越大。

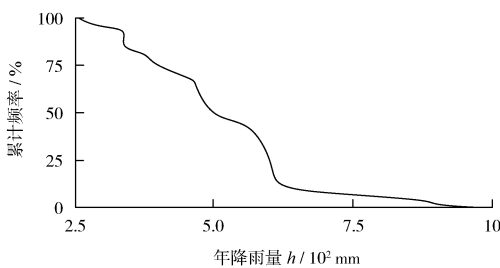


图 3 年降雨量及其累计频率

Fig. 3 Annual rainfall and its cumulative frequency

表 1 不同降水年型对应的降雨量和入渗补给量

Table 1 Rainfall and recharge capacity in different precipitation years

降雨年型划分	累计频率 / %	代表年份	年降雨量 h/mm	年入渗补给量 h/mm
极丰水年	10	2010 年	856.6	162.6
丰水年	30	1987 年	598.4	131.6
平水年	55	1994 年	507.2	55.3
枯水年	80	1998 年	407.1	30.3
极枯水年	100	1977 年	295.0	31.4

### 2.3 单次降水特征对入渗补给的影响

在短时强降雨条件下, 研究区域实际入渗补给过程受单次降水特征(单次降雨量、降雨时长、降雨强度等)的影响更为显著。基于此, 对标准年模拟的第一天实施时间加密处理(将时间设为小时), 设定不同的降雨量、降雨时长和降雨强度, 研究短时强降雨条件下单次降雨对研究区域浅层地下水入渗补给规律的影响, 模拟结果见表 2。

由表 2 可知, 短时强降雨条件下, 单次降雨量和降雨强度是影响研究区域浅层地下水入渗补给的主要因素。短时强降雨条件下, 降雨强度与研究区域浅层地下水入渗补给系数呈反比例关系, 即降雨强度越大, 浅层地下水入渗补给系数越小。在降雨强度低于 55 mm/h 的条件下, 单次降雨能够对研究区域浅层地下水产生较为显著的入渗补给。

当降雨强度一致时, 降雨量与研究区域浅层地下水入渗补给系数呈正比例关系, 即降水量越大, 浅层地下水入渗补给系数也越大。当降雨强度低于 15 mm/h 时, 降雨量主要用于补充包气带缺失的水分和土壤、作物、植物等的蒸发蒸腾消耗, 无法对研究区域浅层地下水有效补给。当降雨强度高于 55 mm/h 时, 降雨量的提升无法对研究区域浅层地下水入渗补给产生促进作用, 即在此条件下, 降

表 2 次降水特征与模拟结果

Table 2 Characteristics and simulation results of single precipitation

短时强降雨类别	单次降雨量 h/mm	降雨时长 t/h	降雨强度 / (mm · h <sup>-1</sup> )	入渗补给量 h/mm	径流量 h/mm	入渗系数	短时强降雨类别	单次降雨量 h/mm	降雨时长 t/h	降雨强度 / (mm · h <sup>-1</sup> )	入渗补给量 h/mm	径流量 h/mm	入渗系数
大雨	100	1	55	0.15	21.21	0	特大暴雨	800	1	310	0.11	279.42	0
		2	30	1.10	0.91	0.03			2	155	1.95	453.91	0.02
		4	15	11.40	0	0.03			4	65	29.93	182.55	0.11
		8	10	3.10	0	0.07			8	35	122.91	79.15	0.38
暴雨	200	1	105	0.19	69.52	0							
		2	55	1.67	46.18	0.03							
		4	25	13.19	2.44	0.13							
		8	15	13.31	0	0.13							

雨量与研究区域浅层地下水入渗补给系数呈反比例关系,降雨量越大,浅层地下水入渗补给系数越小。

导致研究区域浅层地下水入渗补给系数降低的主要因素是地表径流的形成,而地表径流的形成主要受表层土壤渗透性和降水强度的相对大小的影响。试验区表层土壤饱和渗透系数为30 mm/h,当降雨强度低于30 mm/h时,无法形成地表径流,研究区域地表入渗强度受降雨影响;当降雨强度高于30 mm/h时,降雨强度与地表径流量之间为正相关,研究区域地表入渗强度受土壤渗透能力限制。

#### 2.4 应用性分析

依据上述对研究区域浅层地下水入渗补给规律研究的方法,结合1990—2019年研究区域降雨数据,采用科学的蓄水排水措施,模拟研究区域近30年自然灾害(干旱、洪涝等)情况。统计数据显示,1990—2019年期间研究区域除了1998年为小旱,2001年为轻度干旱、2010年为轻度洪涝外,其余年份均为无自然灾害;模拟结果显示,研究区域除了1998年和2001年为轻度干旱、2010年为轻度洪涝外,其余年份均为无自然灾害。可见,用文中的研究方法进行模拟预测,结果仅将1998年的小旱预测为轻度干旱,与实际统计结果存在1处区别外,其余年份均与实际相符。由此说明,文中所采用的研究方法对研究区域浅层地下水入渗补给规律分析结果较为准确。可能是由于研究区域为平原地区,土壤岩性变化较小,预测时未考虑该因素,导致预测结果出现微小偏差。在今后的研究中,将考虑所在地区的土壤岩性,进一步探讨降水量与地下水入渗补给规律。

### 3 结论

(1)文中提出短时强降雨条件下平原区浅层地下水入渗补给规律的研究方法,并以豫东平原惠北试验区作为研究区域开展研究。

(2)研究区域内浅层地下水入渗补给量与降雨量呈正比例关系。在降雨强度低于15 mm/h的条件下,降雨量主要用于补充包气带缺失的水分,以及土壤、植物等的蒸发蒸腾消耗,无法有效补给浅层地下水。

(3)在降雨强度高于55 mm/h的条件下,降雨量的提升无法对研究区域浅层地下水入渗补给产生促进作用。当降雨强度低于30 mm/h时,无法形成地表径流,研究区域地表入渗强度受降雨影

响。在降雨强度高于30 mm/h的条件下,降雨强度与地表径流量之间表现为正相关。

#### [参考文献]

- [1] 王仕琴,郑文波,孔晓乐. 华北农区浅层地下水硝酸盐分布特征及其空间差异性[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1476 - 1482.
- [2] 李昊旭,邵景力,崔亚莉,等. 不同作物覆盖对农业区地下水入渗补给的影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 57 - 65.
- [3] 陈言菲,李翠梅,齐国远,等. 基于GMS的江南某地区浅层地下水溶质迁移规律分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(8): 33 - 38.
- [4] 刘超,朱小龙,蒲丛林,等. 廊坊平原区浅层地下水水流场异变与影响因素研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 153 - 158.
- [5] 王玉伟,王凤,徐征和,等. 基于人工示踪法的位山灌区地下水补给特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(5): 142 - 148.
- [6] LI J K, LI F, LI H E, et al. Analysis of rainfall infiltration and its influence on groundwater in rain gardens[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(22): 22641 - 22655.
- [7] 崔小顺,郑昭贤,程中双,等. 穆兴平原北区浅层地下水水化学分布特征及其形成机理[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 146 - 153.
- [8] 李海云,梁籍,郭道宇. 再生水补给河道入渗区地下水水质时空变异分析[J]. 环境工程学报, 2017, 11(12): 6309 - 6320.
- [9] 王金哲,张光辉,严明疆,等. 环渤海平原土壤和浅层地下水化学特征的空间关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(8): 128 - 134.
- [10] 王朋辉,姜光辉,袁道先,等. 岩溶地下水位对降雨响应的时空变异特征及成因探讨——以广西桂林甑皮岩为例[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 56 - 64.
- [11] NOILHAN J, PLANTON S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models[J]. Monthly Weather Review, 1989, 117: 536 - 549.
- [12] 魏兴,周金龙,贾瑞亮,等. 喀什地区不同TDS浅层地下水分布及资源量估算[J]. 节水灌溉, 2017(9): 51 - 54.
- [13] 卫文,陈宗宇. 气候变化情景下的地下水潜在补给变化影响分析——以栾城试验站为例[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 29 - 35.
- [14] 狄胜同,贾超,张少鹏,等. 华北平原鲁北地区地下水超采导致地面沉降区域特征及演化趋势预测[J]. 地质学报, 2020, 94(5): 1638 - 1654.
- [15] 葛孟琰,马瑞,孙自永,等. 高寒山区河水与地下水相互作用的温度示踪:以黑河上游葫芦沟流域为例[J]. 地球科学, 2018, 43(11): 4246 - 4255.
- [16] 唐学芳,吴勇,陈晶,等. 基于DRASTIC-GIS模型的成都典型区域地下水脆弱性评价[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(6): 28 - 32.
- [17] 刘金巍,刘雪松,张涛,等. ICP-MS法测定地下水中痕量元素的条件选择[J]. 环境监测管理与技术, 2019, 31(3): 53 - 56.

本栏目编辑 谢咏梅