

文章编号: 2097-096X(2023)-01-0037-10

河北平原典型小流域降雨入渗补给规律研究

张俊芝¹, 张子元², 王庆明³

(1. 河北省水文勘测研究中心, 河北 石家庄 050031; 2. 河北省水土保持工作站, 河北 石家庄 050031;

3. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 准确计算降雨入渗补给量是评价平原区地下水资源量的基础, 传统的年补给系数法未考虑降雨特征、土壤墒情等因素影响, 导致评价结果精度不高。本研究以河北平原下博和沧县运西两个典型小流域为例, 采用动态分析法研究次降雨的入渗补给过程。结果显示以 7 d 为时间间隔适合作为划分次降雨的标准, 次降雨量加土壤含水量($P+SW$)与降雨入渗补给量(P_r)相关性最好, 优于次降雨量(P)和次降雨量加前期雨量($P+P_a$); 动态分析法计算的降雨入渗补给量较传统降雨入渗系数法, 精度提高 22%~40%, 且年补给系数法高估了河北平原区的年地下水补给量。本研究为河北中东部平原准确评价降雨入渗补给量提供了技术参考, 对支撑区域的地下水合理开发利用及地下水超采综合治理具有较强的科学和实践意义。

关键词: 降雨入渗补给; 动态分析法; 次降雨; 土壤含水量; 地下水位

中图分类号: TV121⁺.1

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20220343

1 研究背景

准确计算降雨入渗补给量是评价平原区地下水资源量的基础^[1], 尤其对于河北省中东部平原区来说, 确定降雨入渗补给量是合理制定区域地下水超采综合治理方案的关键环节^[2]。目前常用的年补给系数法^[3], 即根据区域的年降雨量乘以年补给系数得出降雨入渗补给量, 在实际应用中难以解决两个问题: 一是每年的降雨频次、分布特征均不相同, 采用固定的年降雨入渗补给系数是否导致地下水资源量评价结果的误差^[4], 二是前期土壤含水量、地下水埋深等因素时刻变化, 同等的降雨未必形成同等的入渗补给量, 如何确定单次降雨的入渗补给量^[5]。

准确评价降雨入渗补给量是地下水水文学的传统研究方向, 前人利用不同方法开展过大量的研究工作。申豪勇等^[6]利用氯离子质量守恒的原理估算了裸露区中等岩溶发育区和覆盖区的降雨入渗系数, 取得的结果与该地区已有的成果基本吻合, 为同类型地区降雨入渗系数的准确估算提供了新的方法。刘玮等^[7-8]综合全国各流域片内的分析成果, 列出不同岩性在不同降雨量年份条件下的平均年降雨入渗补给系数的取值范围。宋秋波等^[9]采用水均衡方法, 以年降雨作为一次降雨过程, 进一步改进了计算降雨入渗补给系数的方法。王润冬等^[10]利用 MODCECLE (An Object Oriented Model for Basin Scale Water Cycle Simulation) 模型在衡水野外试验田田间尺度下, 分析研究了不同灌溉条件的地下水补给规律和补给量。李金柱^[11]分析得出不同岩性、不同年降雨量在不同地下水埋深条件下的降雨入渗补给系数, 并对降雨入渗补给的最佳地下水埋深和大埋深稳定点存在的机理进行了探讨。崔浩浩等^[12]基于地质地貌特征, 针对降雨入渗机理及地质结构对降雨入渗过程和速率影响进行了研究。还有一些学者总结了降雨入渗补给的模式, 综合考虑降雨入渗及其滞后、降雨入渗优先补给等, 研究了土壤不同岩性、不同埋深、不同降雨时段与不同土壤含水量条件下的降雨入渗补给过程^[13-14]。总的来说, 自然

收稿日期: 2022-09-07; 网络首发时间: 2023-01-06

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1788.TV.20230106.1620.006.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200204); 国家自然科学基金项目(52061125101)

作者简介: 张俊芝(1984-), 高级工程师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 279824586@qq.com

通讯作者: 王庆明(1987-), 博士, 高级工程师, 主要从事水文过程解析与模拟研究。E-mail: wangqm@iwhr.com

资源部门多集中于包气带岩性对年降雨入渗补给系数的影响^[15]，水利部门多采用试验站法、动态分析法、数值模型法等方法研究年降雨入渗补给系数的规律^[16-17]，但目前专门针对大区域尺度的次降雨入渗补给过程分析研究相对较少，无法支撑决策部门掌握次降雨入渗补给量的实际工作。鉴于此，本研究在总结前人成果的基础上，重点研究次降雨入渗补给规律，分析降雨间隔划分、影响因素识别、地下水位影响等问题，为更精确评估河北中东部平原降雨入渗补给量提供方法的探索和规律认识的深化。

2 研究区域及方法

2.1 研究区域 研究区域为河北中东部平原两个典型小流域，下博小流域和沧县运西小流域。下博流域位于衡水市，流域形状近似长方形，集水面积 150 km²，流域相对封闭，地势西高东低，流域地面平均高程 23.30 m，平均坡度 0.45‰。流域内主要河流为朱家河，全长 28.5 km。2011—2015 年下博流域的平均降水量为 466 mm，其中汛期降水量为 329 mm，占全年降水量的 71% 左右；平均蒸发量为 815 mm，其中汛期蒸发量为 397 mm，占全年总蒸发的 49% 左右，多年平均浅层地下水埋深为 7.9~8.6 m。沧县运西小流域位于沧州市中部，集水面积 582 km²，整个地形西南高东北低，平均坡度为 0.1‰。2011—2015 年平均降水量为 550 mm，其中汛期降水量为 422 mm，占全年降水量的 77% 左右，多年平均浅层地下水埋深为 1.7~3.6 m。两个小流域地下径流微弱，地下水主要以降雨补给为主，消耗项主要是潜水蒸发和开采，在一次降雨的短时间内，水平排泄量和蒸发消耗量都很小，可以忽略不计^[6]。研究区位置及站点分布图见图 1。

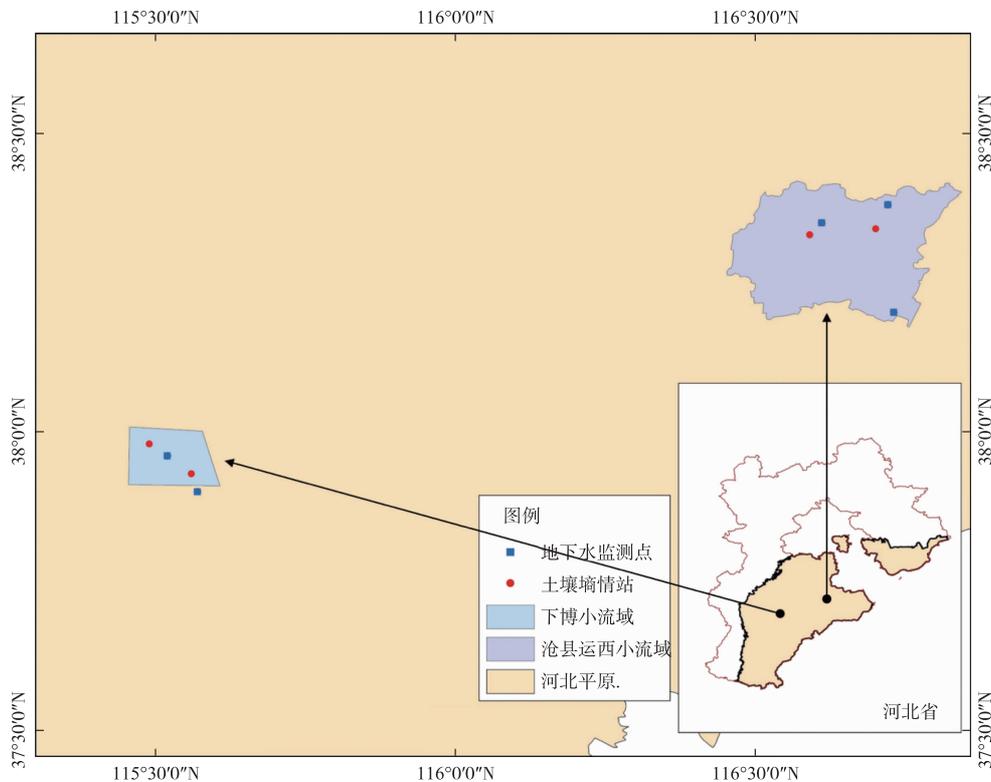


图 1 典型小流域位置及监测站点分布图

Fig.1 Location of typical small watershed and distribution of monitoring stations

2.2 计算方法

(1) 动态分析法计算次降雨入渗补给量

动态分析法是在地下水水平排泄微弱的平原地区，考虑次降雨特征和前期土壤墒情，分次累计得到时段内的降雨入渗补给量方法，相较于传统年补给系数法，动态分析法的次降雨入渗补给过程分析

更科学，结果也更可靠^[18-19]。

动态分析法首先要对次降雨进行划分，根据以往研究成果分析^[20-21]，降雨间隔选取小于 3 d，降雨引起的地下水位动态变化不易划分，降雨间隔选取大于 14 d，则可能将多次降雨混合，弱化了前期土壤含水量的影响，故本次选取 3~14 d 无雨作为次降雨划分的时间间隔，采取试算的方法，确定最优的次降雨划分时间间隔。

在确定了次降雨量划分间隔，根据地下水位变化幅度 ΔH 和水位变动带给水度 μ (见表 1，给水度来源于河北省第二次水资源评价成果，也是目前的通用值)，确定次降雨的入渗补给量 P_r 。当计算时段内有数次降雨，则将每次降雨引起的地下水位上升幅度相加，再乘以给水度，得到时段内的降雨入渗补给量，公式如下。

$$P_r = \sum_i^n \Delta H \times \mu \times A \quad (1)$$

式中： P_r 为时段内入渗补给量， m^3 ； n 为时段内降雨总次数； i 为次降雨； ΔH 为次降雨后地下水位上升幅度， m ； μ 为给水度； A 为研究区面积， m^2 。

表 1 河北省平原区浅层地下水位变化带给水度表
Table 1 Specific yield of shallow groundwater table change in Hebei Plain area

岩性	山前平原	中东部平原	滨海平原	山间盆地
黏土	0.03~0.04	0.03~0.04		0.02~0.037
黏土、亚黏互层	0.048~0.05	0.03~0.045	/	/
亚黏土	0.03~0.06	0.035~0.05	0.03~0.04	0.02~0.05
亚砂黏土互层	0.045~0.065	0.035~0.055	/	/
亚砂亚黏互层	0.045~0.07	0.035~0.06	0.045	/
亚砂土	0.055~0.08	0.05~0.074	/	0.03~0.06
粉砂	0.06~0.08	0.05~0.07	/	0.05~0.07
粉细砂	0.1~0.15	/	/	0.12
细砂	0.08~0.17	0.06~0.08	/	0.15
中砂	0.09~0.18	0.075~0.12	/	0.15
粗砂	0.18~0.21	0.1~0.16	/	0.12~0.16
砂砾石	0.21~0.23	/	/	/
砾卵石	0.2~0.26	/	/	0.14~0.23

注：给水度数据来源于河北省第二次水资源调查评价

(2) 水均衡法验证

水均衡一般指评价期内多年平均地下水总补给量、总排泄量和浅层地下水蓄变量三者之间的均衡关系，如式 2 所示，不同方法计算出的水均衡差越小，说明方法的精度越高，结果越可靠。水均衡法^[22]适用于降雨、地下水位、补给量、排泄量等监测资料以及水文地质参数数据完整丰富的地区，研究选择资料丰富、且有较多研究成果的衡水市下博和沧州沧县运西两个小流域作为验证流域，分别采用动态分析法和传统年补给系数法计算水均衡分项，对比两种方法计算的水均衡差。

水均衡差需分析多年平均地下水总补给量、总排泄量和浅层地下水蓄变量三者之间的均衡关系，如下式：

$$Q_{\text{总补}} - Q_{\text{总排}} \pm \Delta W = X \quad (2)$$

$$\delta = X / Q_{\text{总补}} \quad (3)$$

式中： $Q_{\text{总补}}$ 为浅层地下水总补给量， $万 m^3$ ； $Q_{\text{总排}}$ 为浅层地下水总排泄量， $万 m^3$ ； ΔW 为浅层地下水蓄变量， $万 m^3$ ； X 为绝对均衡差， $万 m^3$ ； δ 为相对均衡差。

在河北省中东部平原区，公式表述如下：

$$Q_{\text{总补}} = Q_{h(q)} + Q_g + P_r \quad (4)$$

$$Q_{\text{总排}} = Q_k + E + Q_y \quad (5)$$

其中： $Q_{h(q)}$ 为河渠渗漏补给量， 万m^3 ； Q_g 为农田灌溉入渗补给量， 万m^3 ； P_r 为降雨入渗补给量， 万m^3 ，可采用动态分析法和年入渗补给系数法等计算； Q_k 为浅层地下水开采量， 万m^3 ； Q_y 越流排泄量， 万m^3 ； E 为潜水蒸发量， 万m^3 。其中，除降雨入渗补给量外，其他各分项在两个小流域均有成熟的监测或计算方法，本研究不在赘述，在对比水均衡差时，除降雨入渗补给量，其他各分项采用相同的值。

3 结果与分析

3.1 基于动态分析法的次降雨入渗补给量计算

3.1.1 次降雨间隔的划分 为精确的划分次降雨时段长度，选取雨量站、地下水位观测井距离较近，数据关系较好的测站，作为划分场次降雨的数据来源，本次研究选取两个小流域内 5 个典型站点的次降雨量和次降雨入渗补给量进行分析，见表 2 所示。选取 3~14 d 无雨日作为次降雨划分时段间隔，通过分析次降雨入渗补给量与次降雨量拟合度确定最优划分时段，结果如图 2 所示。选取 2003—2015 年的 127 次降雨，在不同划分时间间隔下，次降雨入渗补给量(P_r)与次降雨量(P)关系较好，其中 G-001、G-003、G-004 三个站点 7 d 无雨时 $P_r \sim P$ 相关系数最高分别为 0.79、0.83 和 0.86，G-002 和 G-005 两个站点 8 d 无雨日时 $P_r \sim P$ 相关系数最高，分别为 0.84 和 0.70，综合来说，可选取 7 d 无雨日作为次降雨划分适合河北中部平原地区的降雨特征。

表 2 地下水监测井与土壤墒情监测站对应情况

Table 2 Corresponding situation of groundwater monitoring wells and soil moisture monitoring stations

编号	地下水观测井		土壤墒情监测站	
	经度	纬度	经度	纬度
G-001	116.61	38.35	116.59	38.33
G-002	116.72	38.38	116.7	38.34
G-003	116.73	38.21	116.73	38.2
G-004	115.52	37.96	115.49	37.98
G-005	115.57	37.9	115.56	37.93

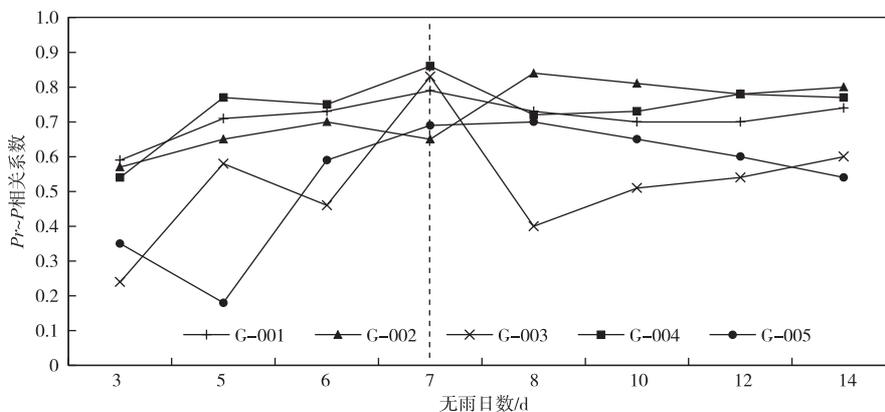


图 2 不同无雨日间隔下 $P_r \sim P$ 相关性分析

Fig.2 Correlation analysis of $P_r \sim P$ at different rainless day intervals

3.1.2 动态分析法计算结果及对比验证 选取 2011 年、2012 年和 2014 年分别代表平水年、丰水年和枯水年，分别采用动态分析法和传统年补给系数法计算降雨入渗补给量，与排泄量和地下水蓄变量对

比求水均衡差，评价两种计算方法结果的精度。动态分析法由公式(1)计算得出，年补给系数法即根据年降雨量乘以年补给系数得出，年补给系数来源于河北省水资源评价结果。下博流域水均衡法各分项数据如表3所示，2011年、2012年和2014年下博流域采用动态分析法计算的地下水总补给量分别为555万 m^3 、810万 m^3 和150万 m^3 ，采用传统年补给系数法计算的地下水总补给量分别为1245万 m^3 、1830万 m^3 和465万 m^3 ，两种方法计算结果相差较大，在2012年甚至相差一倍以上，三个年份平均，年补给系数法较动态分析法计算的降雨入渗补给量多675万 m^3 。三个水平年平均总排泄量为866万 m^3 ，蓄变量减少120万 m^3 ，其中降雨是地下水的最大补给项，人工开采是最大的地下水排泄项。

表3 下博小流域水均衡计算结果表
Table 3 Water balance calculation results of Xiaobo small watershed

年份	降雨量/mm		补给量 $Q_{补}/(万m^3)$			排泄量 $Q_{排}/(万m^3)$			蓄变量/(万 m^3)	
			降雨入渗补给量 Q_b	灌溉补给量 Q_g	侧向流入量 Q_c	侧向流出量 Q_e	越流量 Q_y	浅层地下水开采量 Q_k		地下水蓄变量 ΔW
2011	491	平	555 ^a	1245 ^b	259	99	109	261	542	-136
2012	582	丰	810	1830	235	99	71	217	523	225
2014	237	枯	150	465	193	88	91	251	534	-450
平均	437		505	1180	229	95	90	243	533	-120

注：^a列代表采用动态分析法计算的降雨入渗补给量，^b列代表采用年补给系数法计算的降雨入渗补给量。

沧县运西地区水均衡法计算各分项如表4所示，采用动态分析法得到的降雨入渗补给量分别为3110万 m^3 、3648万 m^3 和897万 m^3 ，采用年补给系数法得到的降雨入渗补给量分别为4246万 m^3 、6877万 m^3 和1375万 m^3 ，两种方法的计算结果同样相差巨大，三个水平年平均降雨入渗补给量为2552万 m^3 和4087万 m^3 ，相差超过60%。总排泄量为2213万 m^3 ，蓄变量增加767万 m^3 ，其中降雨入渗是最大的补给项，潜水蒸发是最大的排泄项。

表4 沧县运西小流域水均衡计算结果表
Table 4 Water equalization calculation results of Cangxian Yunxi small watershed

年份	降雨量/mm		补给量 $Q_{补}/(万m^3)$			排泄量 $Q_{排}/(万m^3)$			蓄变量/(万 m^3)
			降雨入渗补给量	灌溉补给量	蒸发量 E	越流量 Q_y	浅层地下水开采量 Q_k	地下水蓄变量 W	
2011	545	平	3110 ^a	4246 ^b	174	1556	672	69	1256
2012	765	丰	3648	6877	135	1477	637	52	2093
2014	293	枯	897	1375	223	1405	670	102	-1047
平均	534		2552	4087	177	1479	660	74	767

注：^a列代表采用动态分析法计算的降雨入渗补给量，^b列代表采用年补给系数法计算的降雨入渗补给量。

将动态分析法和年补给系数法的结果进行对比，结果如表5所示，在下博小流域动态分析法计算的降雨入渗补给量带入水均衡法得出的水均衡差为1%~15%，年补给系数法得到的水均衡差为43%~52%，动态分析法平均水均衡差精度提高40%；在沧县运西小流域动态分析法的水均衡差在-1%~-13%，而年补给系数法得到的水均衡差20%~39%，动态分析法平均水均衡差精度提高22%。从水均衡差上看动态分析法的结果更准确，补给项与排泄项平衡结果更好。动态分析法根据次降雨入渗补给量累积得出年入渗补给量，能够考虑雨型和前期土壤水量的影响，而年补给系数法，是根据历史经验的入渗补给系数乘以年降雨量得出，误差较大。另外，年补给系数法计算的降雨入渗补给量远高于动态分析法计算结果，意味着河北中东部平原的真实入渗补给量可能长期被高估。

表 5 两种方法计算结果均衡差对比结果

Table 5 Comparison of equilibrium difference calculated by the two methods

年份	下博小流域			沧县运西小流域		
	降雨量/mm	均衡差/%		降雨量/mm	均衡差/%	
		动态分析法	年补给系数法		动态分析法	年补给系数法
2011	491	15	52	545	-8	20
2012	582	9	52	765	-13	39
2014	237	1	43	293	-1	29
平均	437	10	50	534	-9	30

3.2 小流域次降雨入渗补给规律

3.2.1 前期土壤墒情与降雨入渗补给关系 降雨入渗补给量与前期土壤墒情密切相关，通常前期雨量 (P_a) 越大、前期土壤含水量 (SW) 越高，土壤吸收的水量越少，形成的降雨入渗补给量越多，入渗补给系数越大。本研究将入渗补给量 (P_r) 分别和次降雨量 (P)、次降雨量加前期影响雨量 ($P+P_a$) 以及次降雨量加前期土壤含水量 ($P+SW$) 建立关系曲线，确定最佳拟合关系。如图 3 所示，下博小流域和沧县运西小流域点的 $P_r \sim P$ 、 $P_r \sim (P+P_a)$ 、 $P_r \sim (P+SW)$ 均符合线性关系，考虑前期影响雨量或前期土壤含水量后，与降雨入渗补给量的相关性均有所提高， $P_r \sim P$ 决定系数为 0.64， $P_r \sim (P+P_a)$ 和 $P_r \sim (P+SW)$ 的决定系数分别为 0.70 和 0.76，降雨量加前期土壤含水量与次降雨入渗补给量的相关关系更强。故在评价地下水补给量时，应结合土壤墒情站，考虑前期土壤墒情才能得到相对准确的结果。

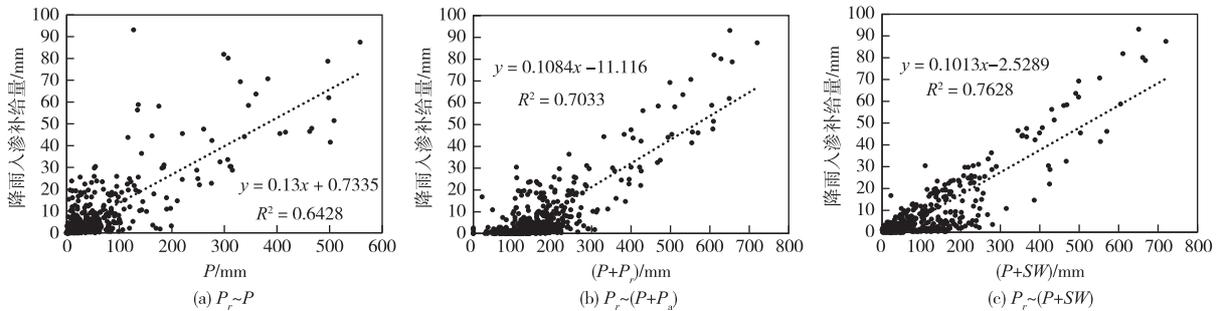


图 3 降雨入渗与土壤墒情的关系

Fig.3 Correlation between rainfall infiltration and soil moisture

3.2.2 补给地下水的降雨阈值 下博小流域地下水埋深约为 7.9~8.6 m 左右，如图 4 所示，2011 年、2012 年和 2014 年下博小流域共有 44 场降雨，其中有 19 场降雨监测到地下水位波动，即次降雨补给到地下水，其它次降雨均未引发地下水位波动，最高次降雨量为 364 mm ($P+SW$ 为 451 mm)，入渗补给地下水量为 42 mm，平均 ($P+SW$) 超过 165 mm 才会入渗补给到地下水，三年平均次降雨入渗补给系数为 0.025 ($P_r/(P+SW)$)。沧县运西小流域地下水埋深约为 1.7~3.6 m，如图 5 所示，在沧县运西小流域三个水平年共产生 45 次降雨，有 33 次降雨补给到地下水，最高次降雨量为 436 mm ($P+SW$ 为 609 mm)，入渗补给地下水量为 30 mm，平均 ($P+SW$) 超过 94 mm 才会入渗补给到地下水，三年平均次降雨入渗补给系数为 0.038 ($P_r/(P+SW)$)。

3.2.3 不同降雨量对入渗补给量的影响 两个小流域不同降雨量条件下 $P_r \sim (P+SW)$ 关系，如图 6 所示，沧县运西小流域浅层地下水埋深较浅，同等降雨量条件，入渗补给量多于下博小流域，并且随着降雨量增多差距越来越大。当埋深确定的情况下，($P+SW$) $\sim P_r$ 成 S 型曲线关系，当 ($P+SW$) < 250 mm 时， P_r 随着 ($P+SW$) 增大缓慢增加，此时下博小流域的降雨入渗补给系数为 0.017，沧县运西小流域为 0.029；当 250 mm \leq ($P+SW$) \leq 500 mm 时， P_r 随着 ($P+SW$) 增大增速变快，此时下博小流域的降雨入渗补给系数为 0.043，沧县运西小流域为 0.075；当 ($P+SW$) > 500 mm 时， P_r 随着 ($P+SW$) 增大增速变缓，此时下博小流域的降雨入渗补给系数为 0.066，沧县运西小流域为 0.11。($P+SW$) 较小时，土壤初

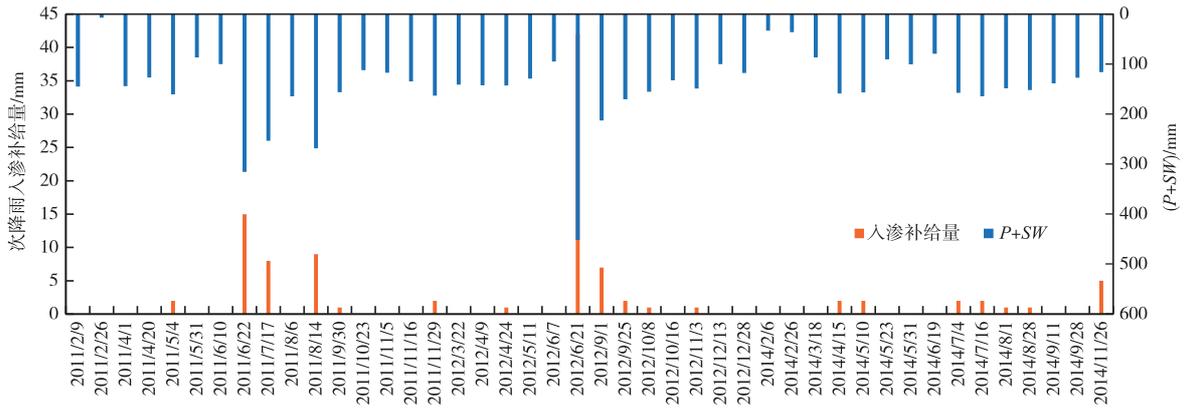


图4 下博小流域动态分析法入渗补给量计算结果

Fig.4 Calculation results of infiltration recharge by dynamic analysis method in Xiabo watershed

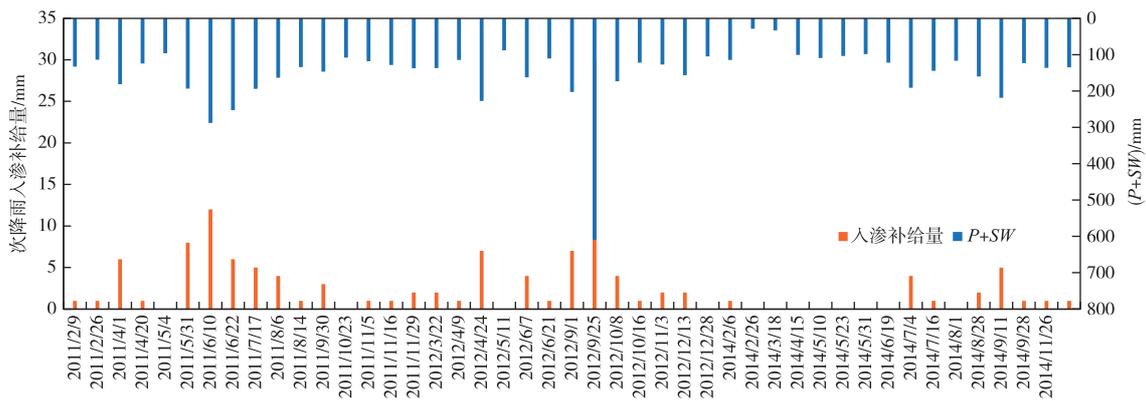


图5 沧县运西小流域动态分析法入渗补给量计算结果

Fig.5 Calculation results of infiltration recharge by dynamic analytical method in Cangxian Yunxi small watershed

始含水量低，次降雨首先被土壤吸收，不会产生入渗补给量，随着 $(P+SW)$ 增大，土壤逐渐达到田间持水率，土壤吸力减小，入渗补给量增大，直至达到稳定下渗量，此时， $(P+SW)$ 再增大，入渗补给速率是稳定的，多余的降雨将形成地表产流。

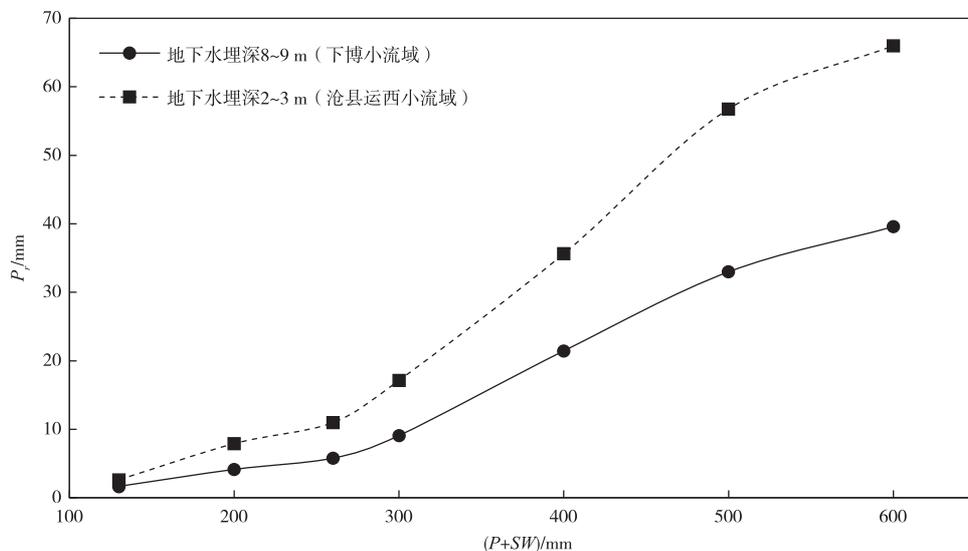


图6 不同地下水埋深条件下 $P_r \sim (P+SW)$ 拟合曲线

Fig.6 Fitting curves of $P_r \sim (P+SW)$ under different groundwater depths

由于地下水补给过程十分复杂,受评价时段、降雨量、地下水埋深、数据观测精度等多种因素影响,即使在相近的区域不同学者评估出的地下水补给量也有相当大的差异^[23-25]。目前,采用水均衡法校正评价结果的精度是常用的方法,本研究的结果说明在研究时段内,动态分析法的评价精度是令人满意的,但是在不同时段、不同地下水埋深等条件下,动态分析法也应有相应的调整。动态分析法所需要地下水位观测数据,目前在部分地区推广还存在困难,但随着河北省地下水监测站网的逐步完善,未来评价地下水补给量的精度将逐步提高,技术方法也会逐步更新发展,动态分析法的应用前景也会更加广泛。

4 结论

本研究采用动态分析法评价了河北平原两个典型小流域 2011、2012 和 2014 年地下水补给量,通过水均衡差验证了动态分析法的适用性,并分析了降雨间隔、前期土壤墒情和地下水埋深等因素对地下水补给的影响,主要结论如下:

(1)河北中东部平原适合以 7 d 无雨日作为划分场次降雨的时间间隔标准,将次降雨量(P)加上前期土壤含水量(SW)后,能够提高单纯以次降雨量推求地下水补给量的精度。

(2)地下水埋深是影响地下水补给的重要因素,下博小流域地下水埋深约为 7.9~8.6 m, ($P+SW$) 超过 165 mm 才会入渗补给到地下水;沧县运西小流域地下水埋深约为 1.7~3.6 m,平均($P+SW$) 超过 94 mm 才入渗补给到地下水。

(3) ($P+SW$) 与地下水补给量(P_r)呈 S 型曲线关系,当 ($P+SW$) < 250 mm 时, P_r 随着 ($P+SW$) 增大缓慢增加,当 250 mm ≤ ($P+SW$) ≤ 500 mm 时, P_r 随着 ($P+SW$) 增大增速变快, ($P+SW$) > 500 mm 时, P_r 随着 ($P+SW$) 增大增速变缓。

参 考 文 献:

- [1] 毕彦杰, 赵晶, 张文鹤, 等. WACM4.0 模型模拟内蒙古河套地区山水林田湖草系统水循环[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 140-158. (BI Yanjie, ZHAO Jing, ZHANG Wenge, et al. Simulation of hydrological cycle for mountain-water-forest-cropland-lake-grass system in Hetao region, Inner Mongolia of China by WACM4.0 model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(14): 140-158. (in Chinese))
- [2] 商佐, 唐蕴. 吐鲁番盆地平原区地下水控制性指标研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(1): 79-87. (SHANG Zuo, TANG Yun. Research on control indexes of groundwater in the plain area of Turpan Basin[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(1): 79-87. (in Chinese))
- [3] 陈建峰. 降雨入渗补给系数变化规律研究[J]. 地下水, 2022, 44(2): 169-171. (CHEN Jianfeng. Study on variation law of rainfall infiltration recharge coefficient[J]. Ground Water, 2022, 44(2): 169-171. (in Chinese))
- [4] 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, YANG Jinzhong. Study on spatial variability of subrainfall infiltration coefficient and simulation of the stochastic field[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(1): 79-85. (in Chinese))
- [5] 杨磊, 张涵丹, 陈利顶. 黄土宽梁缓坡丘陵区次降雨对土壤水分补给效率与阈值研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(4): 457-466. (YANG Lei, ZHANG Handan, CHEN Liding. Identification on threshold and efficiency of rainfall replenishment to soil water in semi-arid loess hilly areas[J]. Science China: Earth Sciences, 2018, 48(4): 457-466. (in Chinese))
- [6] 申豪勇, 梁永平, 唐春雷, 等. 应用氯量平衡法估算娘子关泉域典型岩溶区的降雨入渗系数[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(6): 31-35. (SHEN Haoyong, LIANG Yongping, TANG Chunlei, et al. Estimation of the infiltration coefficient based on chloride mass balance in a typical karst region of the Niangziguan spring area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(6): 31-35. (in Chinese))

- [7] 顾文龙, 卢文喜, 马洪云, 等. 地下水数值模拟分析中降雨入渗补给强度及渗透系数不确定性评价[J]. 水电能源科学, 2015, 33(11): 45-48, 64. (GU Wenlong, LU Wenxi, MA Hongyun, et al. Uncertainty evaluation of precipitation infiltration rate and hydraulic conductivity in groundwater numerical simulation analysis[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(11): 45-48, 64. (in Chinese))
- [8] 刘玮. 谈水文地质降雨入渗补给系数的确定[J]. 黑龙江科技信息, 2012(20): 12. (LIU Wei. Discussion on determination of hydrogeological rainfall infiltration supplement coefficient[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2012(20): 12. (in Chinese))
- [9] 宋秋波, 黄凯, 乔家乐. 基于改进水位动态法的年降雨入渗补给系数推求[J]. 水文, 2018, 38(3): 43-48. (SONG Qiubo, HUANG Kai, QIAO Jiale. Calculation of annual precipitation recharge coefficient based on improved dynamic water level method[J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(3): 43-48. (in Chinese))
- [10] 王润冬, 陆垂裕, 孙文怀, 等. 基于 MODCYCLE 模型的农田降雨入渗补给研究[J]. 人民黄河, 2011, 33(4): 51-53. (WANG Rundong, LU Chuiyu, SUN Wenhui, et al. Study on rainfall infiltration recharge of farmland based on MODCYCLE model[J]. Yellow River, 2011, 33(4): 51-53. (in Chinese))
- [11] 李金柱. 降雨入渗补给系数综合分析[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2): 29-33. (LI Jinzhu. An analysis of the coefficient of replenishment from infiltration of precipitation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(2): 29-33. (in Chinese))
- [12] 崔浩浩, 张光辉, 张亚哲, 等. 层状非均质包气带渗透性特征及其对降雨入渗的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(3): 1-9. (CUI Haohao, ZHANG Guanghui, ZHANG Yazhe, et al. Permeability characteristics of layered-heterogeneous vadose zone and influence on precipitation infiltration[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(3): 1-9. (in Chinese))
- [13] 吴梦茜, 李桂玲, 蔡甲冰, 等. 玉米浅埋滴灌工程综合效益及对地下水影响分析: 以科尔沁区为例[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(5): 490-498. (WU Mengqian, LI Guiling, CAI Jiabing, et al. Comprehensive benefits of shallow covered drip irrigation project and its impact on groundwater dynamic change in corn field of Keerqin district[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(5): 490-498. (in Chinese))
- [14] 李丽琴, 王志璋, 贺华翔, 等. 基于地下水压采和水源置换的城市供水安全研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(3): 178-187. (LI Liqin, WANG Zhizhang, HE Huaxiang, et al. The study of urban water supply safety based on groundwater compressive exploitation and water source replacement[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(3): 178-187. (in Chinese))
- [15] 吕捷, 樊秀峰, 吴振祥. 基于降雨染色示踪试验的大孔隙流特性研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(5): 109-114, 122. (LÜ Jie, FAN Xiufeng, WU Zhenxiang. Research on macropore flow characteristics based on rainfall dyeing tracer experiment[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(5): 109-114, 122. (in Chinese))
- [16] 张婧, 马贵宏, 高雅, 等. 华北山前平原典型井灌区地下水水位变化影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 21-28. (ZHANG Jing, MA Guihong, GAO Ya, et al. Analysis on influencing factors of groundwater level change in typical well irrigation area in piedmont plain of North China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 21-28. (in Chinese))
- [17] 王玥, 徐磊, 赵建世. 黑河地表-地下水交互作用对水量调度的影响[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(6): 573-580. (WANG Yue, XU Lei, ZHAO Jianshi. Impacts of surface-groundwater interaction on water regulation in middle reaches of Heihe river basin[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(6): 573-580. (in Chinese))
- [18] 杨默远, 潘兴瑶, 刘洪禄, 等. 考虑场次降雨年际变化特征的年径流总量控制率准确核算[J]. 水利学报, 2019, 50(12): 1510-1517. (YANG Moyuan, PAN Xingyao, LIU Honglu, et al. Accurate calculation of the volume capture ratio of annual rainfall considering the field rainfall evolution[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(12): 1510-1517. (in Chinese))
- [19] 李毅, 邵明安. 间歇降雨和多场次降雨条件下黄土坡面土壤水分入渗特性[J]. 应用生态学报, 2008(7): 1511-1516. (LI Yi, SHAO Ming-an. Infiltration characteristics of soil water on loess slope land intermittent and repetitive rainfall conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008(7): 1511-1516. (in Chinese))

- [20] 姚建. 利用动态分析法分析降雨入渗补给系数的变化规律[J]. 黑龙江水利科技, 2015, 43(3): 1-3. (YAO Jian. Change rule analysis of precipitation infiltration recharge coefficient by using dynamic analysis method [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2015, 43(3): 1-3. (in Chinese))
- [21] 张郑贤, 刘艺, 张锋贤. 基于时间序列模型的济南趵突泉地下水位预测[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(1): 51-59. (ZHANG Zhengxian, LIU Yi, ZHANG Fengxian. Prediction of groundwater table based on time series models in Baotu Spring of Jinan[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(1): 51-59. (in Chinese))
- [22] 崔静芝. 水量均衡法在地下水资源评估中的应用分析[J]. 地下水, 2022, 44(3): 51-52. (CUI Jingzhi. Application analysis of water balance method in groundwater resources assessment[J]. Ground Water, 2022, 44(3): 51-52. (in Chinese))
- [23] 吴庆华, 张薇, 蔺文静, 等. 人工示踪方法评价地下水入渗补给及其优先流程度——以河北栾城和衡水为例[J]. 地球学报, 2014, 35(4): 495-502. (WU Qinghua, ZHANG Wei, LI Wenjing, et al. The estimation of groundwater recharge and preferential flow based on the applied tracers: a case study of Luancheng and Hengshui Areas in Hebei Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(4): 495-502. (in Chinese))
- [24] 谭秀翠, 杨金忠, 宋雪航, 等. 华北平原地下水补给量计算分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 73-81. (TAN Xiucui, YANG Jinzhong, SONG Xuehang, et al. Estimation of groundwater recharge in North China Plain [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 73-81. (in Chinese))
- [25] 裴源生, 李旭东, 赵勇, 等. 华北典型地下水大深埋区潜水层垂向补给特征及其给水度[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(1): 176-193. (PEI Yuansheng, LI Xudong, ZHAO Yong, et al. Research on vertical recharge and specific yield of the unconfined aquifer in a typical deep groundwater areas of North China Plain [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1): 176-193. (in Chinese))

Study on the law of rainfall infiltration and recharge in a typical watershed of Hebei Plain

ZHANG Junzhi¹, ZHANG Ziyuan², WANG Qingming³

(1. Hebei Hydrology Survey and Research Center, Shijiazhuang 050031, China;

2. General Station of Soil and Water Conservation of Hebei Province, Shijiazhuang 050031, China;

3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of River Basin Water Cycle, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Accurate calculation of rainfall infiltration recharge is the basis of the evaluation of groundwater resources in plain areas. The traditional annual recharge coefficient method does not consider the influence of rainfall characteristics, soil moisture and other factors, which leads to low accuracy of the evaluation results. In this study, two typical watersheds in Xiabo and Yunxi of Cangxian County in Hebei Plain were taken as examples to study the infiltration and recharge process of secondary rainfall by dynamic analysis. The results show that the interval of 7 days is suitable for the time standard of secondary rainfall. The correlation between secondary rainfall plus soil water content (P+SW) and rainfall infiltration recharge (Pr) is the best, which is better than that of secondary rainfall (P) and secondary rainfall plus early rainfall (P+Pa). The accuracy of rainfall infiltration recharge calculated by dynamic analysis method is 22~40% higher than that of traditional rainfall infiltration coefficient method, and the traditional annual recharge coefficient method overestimates the annual groundwater recharge in Hebei plain area. This study provides a method reference for the accurate evaluation of rainfall infiltration recharge in the central and eastern plain of Hebei Province, and has strong scientific and practical significance for the rational exploitation and utilization of groundwater in the support area and the comprehensive treatment of groundwater overexploitation.

Keywords: rainfall infiltration recharge; dynamic analysis method; secondary rainfall; soil moisture content; groundwater table

(责任编辑: 祁伟)