

# 宁夏中部干旱风沙区降雨入渗补给系数的估算<sup>\*</sup>

李娟<sup>1</sup>, 叶立<sup>2</sup>, 张维江<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 宁夏第二测绘院, 银川 750021)

**摘 要:**降雨入渗补给量是干旱地区地下水资源的重要组成部分,降雨入渗补给系数取用的正确与否直接关系到降雨入渗补给量的估算。宁夏中部干旱风沙区地下水资料相对较少,只能采用现场观测与验证结合的方式进行确定。利用宁夏盐池县猫头梁降雨资料与地下水动态观测资料对宁夏中部干旱风沙区的降雨入渗补给系数进行估算,并用宁夏同心县长沙河流域地下水资料进行验证,得出宁夏中部干旱风沙区的降雨入渗补给系数 0.119 ~ 0.257,为该地区水资源评价工作提供依据。

**关键词:**干旱风沙区; 降雨入渗补给系数; 起始有效雨量

**中图分类号:** S157; S273

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2009)01-0022-05

## The Estimation of the Rainfall Infiltration Coefficient of Arid Aeolian Sand Region in the Middle Area of Ningxia

LI Juan<sup>1</sup>, YE Li<sup>2</sup>, ZHANG Wei-jiang<sup>1</sup>

(1. Civil and Water Conservancy Engineering College of Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. The Second Surveying and Mapping Unit, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** The water resource infiltrated by rainfall is an important part of the underground water resource, which is affected by the coefficient of rainfall infiltration. The data of underground water resource in the arid aeolian sand region of Ningxia is limited; the coefficient of rainfall infiltration only can be decided through observing and verifying. The thesis estimates the coefficient of rainfall infiltration in the Middle Area of Ningxia with the precipitation data and dynamic observed records of groundwater of Maotouliang in Yanchi County, then test it with the observed records of Changshahe watershed in Tongxin County, and conclude that the coefficient of rainfall infiltration in the Middle Area of Ningxia is 0.119 ~ 0.257, which can offer reliable reference for the further study on the evaluation work of the water resources.

**Key words:** arid aeolian sand region; the coefficient of rainfall infiltration; the beginning effective rainfall

宁夏中部干旱风沙区包括盐池、同心两个县全部,海原县大部,灵武、中宁、中卫等市(县)的山区及固原的部分地区,地表大部分覆盖有数十厘米到几十厘米的风积沙,并斑状分布着规模不一的流动、半固定和固定沙丘及由于水力侵蚀形成零星分布的裸露土石山区。地区属于典型的大陆性气候,气候特点是干旱多风,降水稀少,蒸发强烈,水资源十分缺乏,土壤侵蚀严重,生态环境十分恶劣。

降雨入渗补给地下水的过程是大气水 - 土壤水 - 地下水“三水”相互转化过程中最重要、最基本的

环节。降雨入渗补给量是地下水(特别是浅层地下水)的重要补给来源,也是区域水均衡计算中一个很重要的均衡要素。

降雨后,除去地表径流,坑塘滞蓄和植物截留以及蒸发外,入渗部分的水量一部分增加土壤的含水量,仍保持在土壤中;另一部分,超过了土壤的最大田间持水量,成为重力水,继续下渗补给地下水,引起地下水位的上升,这部分补给地下水的水量与降雨量的比值称为降雨入渗补给系数<sup>[1]</sup>。

宁夏中部干旱风沙区地下水埋深较浅,降雨集

\* 收稿日期: 2008-04-25

基金项目: “十一五”科技支撑计划“宁夏河东沙地退化草地植被恢复与利用技术研究与试验示范(盐池)”(2006BAD26B0702)

作者简介: 李娟(1981-),女,宁夏中卫人,硕士,主要从事旱区水资源和水土保持与荒漠化防治方面的教学与研究工作。E-mail: lijuan-shuibao@163.com

中,在地表为覆沙层的地区,降雨后迅速入渗补给地下水,抬高地下水位,然后开采用地下水发展当地的农业生产。但同时该地区水资源贫乏,且存在严重的水资源浪费与不合理利用的现象,因此急需对该地区水资源进行评价,搞清楚水资源状况,对水资源利用进行科学合理的规划。地区地下水主要补给来源是降雨,降雨入渗补给量的确定在该区水资源计算中占有至关重要的作用,因此降雨入渗补给系数的确定就成为该区水资源评价较为关键的问题。本文就猫头梁试验区的地下水观测资料进行降雨入渗补给系数的估算,并且利用宁夏同心县长沙河流域的资料进行验证,对宁夏中部干旱风沙区的降雨入渗补给系数进行估算,为该地区水资源评价工作提供可靠依据。

## 1 试验区概况

由于干旱风沙区地下水资料缺乏,本文选择在水文及地质情况上可以代表该区域的试验区进行地下水动态资料的观测,计算降雨入渗补给系数,进而估算区域内降雨入渗补给系数的大小。

试验区位于宁夏盐池县中部青山乡牛记圈村猫头梁大队,占地面积 366.7 hm<sup>2</sup>,全部为沙漠化退化草场,目前主要以封育禁牧为主,采取多种措施进行植被恢复,种植少量苜蓿、柠条、饲料桑等。试验区地处毛乌素沙漠的西南缘,属干旱草原向荒漠草原的过渡地带,典型的大陆性气候,气候特点是干旱多风,降水稀少,光热资源较丰富。平均海拔 1 350 m,年均气温 7.7℃,最高气温 38.1℃,最低气温 -29.6℃;无霜期 160 d 左右;多年年均降水量 260 mm,主要集中在 7 - 9 月三个月,约占年降水量的 60%以上;年蒸发量 2 131.7 mm,蒸发量是降水的 7.2 倍;年均风速 2.8 m/s,年均大风日数为 24.2 d,沙暴日数 20.6 d,年均 5 m/s 的起沙风 323 次;平均相对湿度 51%;地形起伏不大,土地平坦,地带性土壤为灰钙土,主要有风沙土、灰钙土、盐土和白疆土,pH 值 7~8,地表大部分覆盖有数十厘米到十几米厚度的风积沙,堆积在埋深不大的不透水下伏基岩上,原初植被以黑沙蒿、牛心朴子、苦豆子等为主,植被覆盖率低于 20%,生态环境脆弱,自然灾害频繁,生存条件及生产条件受到严重威胁。

## 2 观测与计算结果

### 2.1 试验设计

降雨入渗补给系数分为次降雨入渗补给系数和年降雨入渗补给系数<sup>[2]</sup>。

分析计算降雨入渗补给系数的途径主要包括:室内试验、实验场模拟和动态观测数据分析计算等,其中室内试验方法概念明确,各项参量容易控制,比较能反映基本的变化规律;动态观测数据分析方法则最符合实际条件,但其反映的是综合结果;而实验场模拟方法一方面可以最大限度地反映实际状态,另一方面还可以有针对性地对具体的因素进行规律性分析<sup>[3]</sup>。

根据试验区的实际情况,拟采用地下水动态观测资料分析法对降雨入渗补给系数进行估算。

在以降雨为补给源的地区,在每次大雨或中雨之后,地下水位会显著升高,随后,由于排泄作用,地下水位又缓慢下降。在此过程中,升高的水位反映了入渗地层中入渗水量的多少。

降雨后地下水位上升高度为  $H = H_2 - H_1$  ( $H_1, H_2$  分别为降雨前后地下水位的埋深<sup>[4]</sup>)。设  $P$  为降雨量,  $P_r$  为该次降雨对应的降雨入渗补给地下水的量,则该次降雨入渗补给系数  $a$  为

$$a = \frac{P_r}{P} \quad (1)$$

$P_r$  的确定:  $P_r = \mu \cdot H \cdot F$  (2)

式中:  $\mu$ ——给水度(根据项目区实际情况,取值 0.15);  $H$ ——地下水变幅;  $F$ ——试验区面积。

为获取降雨入渗补给地下水量,根据试验区的地质调查情况,在试验区内选择一封闭小洼地,以保证地下水位升高反映的地下水增量为降雨入渗补给地下水量,洼地面积为 163 011 m<sup>2</sup>,地表覆沙厚度为 0.541~1.127 m,并根据地下水位埋深的不同分为 3 个小区域,布设 14 眼观测井进行地下水位观测。在降雨前观测雨前水位,降雨后立即观测水位是否变化。记录雨后地下水位开始上涨的时间,进行地下水位的加密观测,直到水位不再发生变化为止。

### 2.2 试验观测

2.2.1 次降雨入渗补给系数的计算 经过多次试验以及试验资料的分析,得出该地区的起始有效雨量<sup>[5]</sup>为 5 mm,即该地区低于 5 mm 的降雨量,对地下水不产生补给作用。对盐池县 1961 - 2001 年共 41 a 的降雨资料进行分析,发现该地区 41 a 以来超过 5 mm 以上的有效降雨平均值为 11.49 mm。选取降雨量接近于多年平均有效雨量的降雨量进行降雨后地下水位的观测,以使得计算得出的次降雨入渗补给系数接近于年降雨入渗补给系数。

2003 年 8 月 30 日,试验区降雨 11.2 mm,9:45 水位开始上涨,至 17:00 水位稳定。表 1 为该时间段内的地下水位加密观测记录。

表 1 地下水位观测记录表

观测 #	观测时间				水位 变幅
	9:45	11:45	15:00	17:00	
1	936	923	911	910	26
2	1167	1150	1148	1127	40
3	1026	1013	1008	989	37
4	820	815	808	798	22
5	544	543	541	541	3
6	812	808	807	807	5
7	847	842	835	828	19
8	944	940	934	928	16
9	1242	1236	1228	1225	17
10	1073	1058	1055	1048	25
11	846	846	846	842	4
12	487	476	470	463	24
13	507	494	485	483	24
14	582	572	565	560	22

根据降雨后地下水位变幅,将所选的封闭洼地分为 3 个小区,并利用公式(2)进行降雨入渗补给量的计算,计算结果见表 2。

表 2 观测区降雨入渗补给量计算

区域	补给面积/ m <sup>2</sup>	降雨量/ m <sup>3</sup>	水位变幅/ mm	降雨入渗补 给量/m <sup>3</sup>
	16300	182.56	37	90.47
	40752	456.42	24	146.71
	105959	1186.74	14	222.51
合计	163011	1825.72		459.69

利用公式(1)计算次降雨入渗补给系数  $a_0$ 。

$$= \frac{P_c}{P} = \frac{456.69}{1825.72} = 0.2517$$

表 3 不同水位埋深的降雨入渗补给系数计算

项 目	地下水位埋深/ m						
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
地下水位涨幅/ mm	2.9510	2.3336	1.9279	1.6211	1.3726	1.1632	0.9817
降雨入渗补给系数	0.2570	0.2030	0.1680	0.1410	0.1190	0.1010	0.0850

2.3 结果检验与分析

由于试验区范围较小,且观测区域地面分水线与地下分水线重合,那么在试验区估算得到的降雨入渗补给系数是否可以应用到整个宁夏中部干旱风沙区进行水资源评价工作,为此需要选择一个更大的流域进行降雨入渗补给系数的验证,以确保降雨入渗补给系数估算的可靠性。验证流域选择宁夏同心县长沙河流域。

2.3.1 长沙河流域概况 长沙河流域大部分地处宁夏同心县境内,小部分位于中卫县境内,地理位置东经 105°22′11″ - 105°45′41″,北纬 37°05′35″ -

2.2.2 不同地下水埋深情况下的降雨入渗补给系数估算 影响降雨入渗补给系数的因素很多,主要有:降雨的大小和强度、雨前土壤的含水量、土壤的性质和结构、地下水埋深等。地表土层是否疏松和平整,作物种类和生长情况、水利化程度等,都对它有一定的影响。

根据研究分析<sup>[6]</sup>,起始有效雨量、次降雨量、地下水位埋深有如下相关关系:

$$H = B(P - P_0) \tag{3}$$

$$P_0 = b \lg(1 + H^{1/2}) \tag{4}$$

$$P = P_a + P \tag{5}$$

由以上公式,得

$$H = B[P_a + P - b \lg(1 + H^{1/2})] \tag{6}$$

式中: $P$ ——引起地下水位升幅的有效雨量; $P_0$ ——起始有效雨量; $P_a$ ——前期影响雨量; $B, b$ ——待定系数。

由于宁夏中部干旱风沙区地表多为覆沙层,且地区内风速高、日照充足,土壤蒸发强烈,因此在降雨入渗补给系数的主要影响因素是地下水埋深,因此估算中忽略雨前土壤含水量的影响。根据项目区观测资料,观测时在封闭洼地内的平均水位升幅为 2.810 9 mm,平均地下水位埋深为 1 m,由公式(4)得, $b = 16.6096$ ;由公式(3)得, $B = 0.4547$

因此有  $H = 0.4547[P - 16.6096 \lg(1 + H^{1/2})]$

根据以上公式可以计算出,在多年平均有效雨量 11.49 mm 的水平下不同地下水位埋深时的地下水位涨幅,同时计算不同水位埋深下的降雨入渗补给系数,见表 3。

37°06′14″,是黄河的一级支流清水河下游的一条主要支流,主河道长 71.4 km,河道平均比降 11‰,流域总面积 574 km<sup>2</sup>。流域上游为土石山区,中、下游为干旱草原区。受腾格里沙漠的影响,地表大部分堆积有第四系风积沙,斑状分布有各类沙丘,流域平均植被覆盖度 30%左右。主河道以及较大支沟的河床沉积有 4~15 m 厚的砂砾石,透水性较强,下伏基岩层为弱风化岩层,岩性多为中厚层细砂岩夹薄层板岩、页岩,透水性弱;两岸分布有部分较为平坦的浅山台地;地表流域分水岭与下伏基岩分水岭基本重合,地下潜水与地表径流方向一致。

从 1995 年开始 ,先后用砾砂混合料建成了北沿口、上流水、喊叫水、下流水等 4 座治沟骨干工程 ,拦泥的同时也拦蓄了部分洪水 ,通过坝基沉积的砾沙混合料转化为上下游井灌区的地下水 ,使井灌区面积增加、灌溉保证率提高。各治沟骨干工程控制的流域及其井灌区基本情况见表 4 和表 5。

表 4 长沙河流域治沟骨干工程基本情况

骨干工程名称	流域面积/ km <sup>2</sup>	建成 时间	控制井灌区名称
上流水 骨干坝	120	1998	上流水、下流水
下流水 骨干坝	32	2000	新庄子(包括 石泉)、喊叫水
北沿口 骨干坝	130	1996	新庄子(包括 石泉)、北沿口
喊叫水 骨干坝	100	1999	喊叫水
合 计	382		

表 5 井灌区基本情况及 2002 年取水量统计表

灌区名	灌区面积/ hm <sup>2</sup>	机井数量/ 眼	灌溉取水 量/万 m <sup>3</sup>
上流水	59.3	39	52.579
下流水	160.5	67	142.370
新庄子(包括石泉)	445.5	40	395.680
喊叫水	132.6	70	117.570
北沿口	156.8	28	139.026
总 计	954.7	244	847.225

2002 年长沙河流域降雨量 216.1 mm ,接近于多年平均降雨量。利用水量均衡法对该流域的水资源进行分析计算 ,在确定了地下水补给量与排泄量的基础上进行地下水均衡计算。

2.3.2 流域地下水均衡计算

(1) 地下水排泄量的确定。长沙河流域内的地下水排泄有 2 种形式 :井灌区开采量与潜水蒸发量。根据实地调查 ,流域 2002 年灌溉取水量为 847.225 万 m<sup>3</sup> ,人畜用水量为 12.52 万 m<sup>3</sup> ,合计 859.745 万 m<sup>3</sup>。流域内地下水埋深较浅的地方位于主沟道及其井灌区内 ,对评价区内 244 眼机井水位埋深进行调查 ,得到各井灌区和所在沟道的平均水位埋深及其对应的面积分别为 :上流水地下水位平均埋深 2.68 m ,面积为 5.57 km<sup>2</sup> ;北沿口地下水位平均埋深 2.744 m ,面积 6.14 km<sup>2</sup> ,评价区内其他井灌区及

沟道的地下水位埋深 5.1 ~ 11.4 m ,均大于潜水蒸发的临界深度 5.1 m ,利用公式(7)进行潜水蒸发量的计算。

$$S = E_0 (1 - \frac{H}{H_0})^n \cdot F \tag{7}$$

式中 :  $H$  ——平均埋深 ;  $E_0$  ——水面蒸发强度 ,评价区多年平均水面蒸发量为 1 438.1 mm (E601) ;  $H_0$  ——极限埋深 ,即潜水停止蒸发的深度 ;  $n$  ——综合指数 ,一般 1 ~ 2 ;  $F$  ——计算区域面积。

则评价区 2002 年地下水潜水蒸发量为

$$S = E_0 (1 - H/H_0)^2 = 1438.1 \times [(1 - 2.68/5.1)^2 \times 5.57 + (1 - 2.744/5.1)^2 \times 6.14] \times 0.1 = 368.8 \text{ 万 m}^3$$

(2) 地下水补给量的确定。长沙河流域的地下水补给量有 3 部分组成 :降雨入渗补给量 ,水库渗漏补给量、灌溉水回归补给量。

降雨入渗补给量的确定。长沙河流域内地表大部分堆积为第四系风积土 ,有利于降雨入渗补给地下水 ,根据 2000 年长沙河流域 TM 遥感影像资料分析 ,得到长沙河流域覆沙地面积为 279.97 km<sup>2</sup> ,根据资料 ,地下水埋深为 3 m 时 ,黄土质亚砂土到砂砾石的降雨入渗补给系数为 0.252 ~ 0.644。考虑到流域内地表堆积物为风蚀形成的粗沙 ,综合上述经验值 ,取降雨入渗补给系数为 0.252 ,利用公式(8)进行降雨入渗补给量的计算 :

$$P_r = F \cdot P \tag{8}$$

得出长沙河流域降雨入渗补给地下水量为 1524.638 m<sup>3</sup>。

水库渗漏补给量的确定。长沙河流域地表径流预报模型  $y = 0.0002x^2 - 0.0385x + 3.0414^{[7]}$ 。2003 年降雨量 216.1 mm ,地表径流深 4.05 mm ,在骨干工程控制区域内所形成的地表径流全部被工程拦蓄。

利用区域蒸发量计算水库中的水面蒸发量 ,并根据水库水量平衡原理 (即出入库水量平衡) ,计算流域水库渗漏补给量 121.05 m<sup>3</sup>。

灌溉回归水补给量。长沙河流域内田间渠道距离短 ,但是沙质土渠渗漏严重 ,从机井到田间渠道渗漏量得到取水量的 30 % ,取灌溉回归水渗漏系数 0.3 ,每年有 254.166 万 m<sup>3</sup> 灌溉水回归补给地下水。

(3) 地下水均衡分析。长沙河流域补给项有 :降雨入渗补给量 1 524.64 万 m<sup>3</sup> ,水库渗漏补给量 121.05 万 m<sup>3</sup> ,灌溉回归水补给量 254.17 万 m<sup>3</sup> ,合计 1 899.86 万 m<sup>3</sup> ;排泄项有 :潜水蒸发量 368.8 万 m<sup>3</sup> ,人工开采量 859.75 万 m<sup>3</sup> ,合计 1 228.55 万

m<sup>3</sup>。根据水量均衡公式

$$(P_r + U + K_h) - (S + K) = \mu HF$$

式中： $P_r$ ——降雨入渗补给地下水量； $U$ ——水库渗漏补给量； $S$ ——潜水蒸发量； $K$ ——人工开采量(包括灌溉用水和人畜饮用水量)； $K_h$ ——灌溉回归水量； $\mu$ ——给水度,根据有关文献提供的测定值<sup>[8]</sup>取

0.15； $H$ ——均衡期内地下水位变化幅度； $F$ ——计算区面积。

对流域水资源进行均衡计算,均衡计算结果为正均衡,地下水储存变量 671.31 万 m<sup>3</sup>,地下水平均变幅为 0.15 m。表 6 为流域内观测井 2000 - 2003 年期间的水位埋深观测结果。

表 6 2000 - 2003 年地下水位观测表 m

机主姓名	2000 年		2001 年		2002 年		2003 年	2002 - 2003 水位埋深变幅
	1 月底	2 月底	1 月底	2 月底	1 月底	2 月底	4 月初	
田丰同	10.20	10.18	14.12	14.17	-	10.92	10.0	+0.92
马海	3.70	3.75	3.05	3.15	2.58	2.97	1.2	+1.77
丁生奎	7.90	7.93	13.03	13.08	12.46	10.87	8.4	+2.01
马进武	2.55	2.50	1.39	1.42	2.79	1.76	1.5	+0.76
变电所	6.80	6.90	7.12	7.15	8.47	7.69	5.5	+2.29
杨义清	4.70	4.81	5.27	5.32	7.35	6.13	3.0	+3.13

与 2002 年初的水位埋深相比,2003 年初(未灌溉前)地下水位埋深减少 0.26 ~ 3.13 m,这与均衡分析结果在趋势上是一致的。证明 2002 年的潜水均衡分析结果是正确的,各个水文参数取值也是正确的。但是实测值偏大,分析有以下两个原因:(1)降雨入渗补给系数取为 0.252 偏保守,因此降雨入渗补给量偏小。(2)2001 年降雨量 238 mm,偏于丰水年,降雨入渗补给量相对稍大。

3 结 语

由于宁夏中部干旱风沙区降雨稀少,多集中在 7 - 9 月三个月,其余时间降雨量极小,因此年降雨入渗补给系数接近于次降雨入渗补给系数。通过试验区的地下水动态观测资料计算与长沙河流域 2002 年地下潜水均衡分析验证,宁夏中部干旱风沙区降雨入渗补给系数为 0.119 ~ 0.257,依据充分,可靠性强,可以为该地区今后的水资源评价工作提供依据。

参考文献:

[1] 王志强. 江汉平原四湖地区地下水参数的分析[J]. 水文,1995(4):35-39.  
[2] 张平,李日运. 降雨入渗补给地下水的影响因素[J]. 辽宁大学学报自然科学版,1999(2):118-122.  
[3] 陈志辉. 黑河干流平原区大气降水入渗补给潜水机制的研究[J]. 甘肃地质学报,1997(6):37-40.  
[4] 齐仁贵. 用地下水动态资料分析降雨入渗对地下水的补给[J]. 武汉水利电力大学学报,1999,6(3):58-62.  
[5] 梁文彪. 应用回归分析方法推求降水入渗补给系数[J]. 地下水,2002,24(2):71-73.  
[6] 金光炎,汪家权等. 地下水计算参数的测定与估计[J]. 水科学进展,1997,8(1):17-24.  
[7] 张维江,李娟,王东,等. 宁夏中部风沙区地表径流预报模型研究[J]. 人民黄河,2004,26(2):35-37.  
[8] 全达人. 地下水利用(3 版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996:69-73.

(上接第 21 页)

[3] 王小丹,钟祥浩,范建容. 西藏水土流失敏感性评价及其空间分异规律[J]. 地理学报,2004,59(2):183-188.  
[4] 杨勤科,李锐. 中国水土流失和水土保持定量研究进展[J]. 水土保持通报,1998,18(5):13-18.  
[5] 刘康,康艳,曹明明,等. 基于 GIS 的陕西省水土保持敏感性评价[J]. 水土保持通报,2004,18(5):168-170.  
[6] 陈建军,张树文,李洪兴,等. 吉林省土壤侵蚀敏感性评

价[J]. 水土保持通报,2005,25(3):49-53.  
[7] 莫斌,朱波,王玉宽,等. 重庆市土壤侵蚀敏感性评价[J]. 水土保持通报,2004,24(5):45-59.  
[8] 卢远,华瑾,周兴,等. 基于 GIS 的广西土壤侵蚀敏感性评价[J]. 水土保持研究,2007,14(1):98-100.  
[9] 长江上游及西南诸河考察组. 长江上游及西南诸河水土流失与生态安全综合科学考察[M]. 北京:科学出版社,2008:60-80.