

黑龙港涝洼地水文微循环 特征与农作物水分利用效率的研究*

尹雁峰 陈宏恩

(中国科学院石家庄农业现代化研究所 石家庄 050021)

摘 要 尹雁峰,陈宏恩.黑龙港涝洼地水文微循环特征与农作物水分利用效率的研究.生态
农业研究,1996,4(3):56~60.

阐述了黑龙港涝洼地水文微循环特征,并通过最优识别方法求解水文地质逆问题,得到了地下水通过毛管上升补给土壤的水量;研讨了土壤水分通量法的优缺点及应用条件,并用该法成功地反算了冬小麦生育期内的灌溉水量和降雨补给土壤的水量,对该区农作物水分利用效率进行了研究。

关键词 水文循环 数值模拟 最优识别 水分利用率

Abstract Yin Yanfeng and Chen Hongen (Institute of Agricultural Modernization, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021): A study on the characters of micro-hydrological cycle and water use efficiency of crops in the waterlogged lowland of Heilonggang Region, EAR, 1996, 4(3): 56~60.

The characters of micro-hydrological cycle in waterlogged lowland has systematically explained in this paper. By using optimal identification method to solve the inverse problems of groundwater, the recharge quantity of soil water through capillary rising from groundwater was obtained. The application conditions and the advantages and disadvantages of the soilwater flux method were reviewed. Then the quantity of irrigation and recharge quantity of soil water by precipitation was successfully obtained by using this method. Finally, the water use efficiency of crops in the waterlogged lowland was calculated.

Key words Hydrological cycle, Numerical simulation, Optimal identification, Water use efficiency

涝洼地的地形地貌、水文地质条件不同于周围其它平原区,研究涝洼地水文微循环特征及农作物水分利用效率,对调整种植结构、改进灌溉制度、合理利用农业自然资源等都起着重要的指导意义。

1 涝洼地水文微循环特征

1.1 研究区域概况及水文气象条件

* 中国科学院石家庄农业现代化研究所所长基金资助项目。

本文于1995年12月18日收到,1996年5月18日改回。

研究区位于河北省南皮县境内的四号干沟和四港新河之间,南起泊宁公路,北止段集公路,属海河低平原黑龙江盐渍区。政区上分属王寺、乌马营、莲花池、段六卜四乡镇的18个自然村,区内现有耕地5237hm²,农业人口约2万人。区内分布罗四拨、李杲家、高家等3个浅碟形大洼,径流不畅,部分土地易积水受淹。该区属暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候区,年均气温12.3℃,多年平均降雨量568mm,降雨量年内分配极不均匀,其中汛期6、7、8月份的降雨量占年降雨总量的75%以上;年水面蒸发量为2170mm。

1.2 涝洼地浅层地下水的补给、迳流与排泄

表1 涝洼地与非涝洼地雨后水位回升值

Tab. 1 Rising value of groundwater table after precipitation

地 点 Site	水位埋深(m) Depth of groundwater table		水位回升(m) Rising value of groundwater table
	1994. 7. 3	1994. 7. 9	
涝洼地(王寺大洼) Waterlogged lowland	2. 21	0. 82	1. 39
非涝洼地(常庄) Ordinary area	8. 73	8. 18	0. 55

该区地下水的补给来源主要是大气降水和地表水。涝洼地与非涝洼地最显著的差别在于前者包气带厚度小、地势汇水,这就决定了涝洼地区消耗于湿润包气带所用的降水少,

有利于降水对地下水的补给。以1994年7月3日和6日降雨为例,在常庄和王寺大洼两地,前者降雨对地下水的补给量仅22mm,后者为55.6mm;前者水位上升幅度小,后者水位上升幅度大(见表1)。这种有利于补给地下水的作用也仅表现在汛期开始阶段,随着汛期的继续,降水不断补充浅层地下水,地下水位迅速上升,当地下水位上升至地表附近时,由于浅层地下水含水层没有了库容,这时降雨对涝洼地浅层地下水的补给作用很小;相反,在地势相对较高的地区,降雨对地下水的补给作用一如汛期初期。地表水对地下水的补给,在河北平原尤其是河北东部平原主要表现为沟渠蓄水对地下水的补给。在低洼易涝地区由于地势低,沟渠内有水的时间较周围其它地区长,因此沟渠对浅层地下水的补给作用较周围其它地区为大。低洼易涝地区浅层地下水的迳流基本上有着与平原区相类似的特征:地势平坦,含水层倾斜度小,迳流强度小,导致了涝洼地咸水体不易改造。在王寺大洼涝洼地地下水埋深浅,加上地下水开发程度不高,地下水的排泄主要以面状蒸发为主。

1.3 涝洼地浅层地下水的动态特征

王寺大洼涝洼地浅层地下水的动态主要受降雨、蒸发、植物蒸腾与地表水体(沟渠蓄水)的影响。一般从当年10月下旬至次年3月中旬为水位恢复期,此间气温低,作物根系浅,蒸发蒸腾作用小,沟渠残存水及上游侧向迳流不断补给地下水,使地下水位不断上升。从次年3月下旬~6月底,随着气温的回升、作物的生长,

蒸发蒸腾作用愈来愈强,加之地下水的开采,不断消耗地下水量,使地下水位不断下降,这段时期为地下水位下降期。从次年7月~8月中旬,由于汛期的到来,降雨不断补充

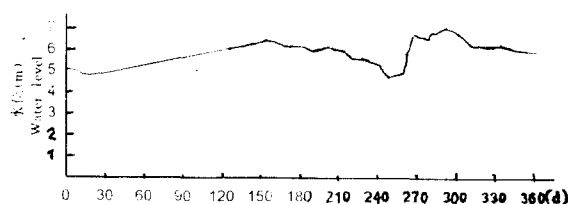


图1 王寺大洼涝洼地浅层地下水水位动态曲线(1993年10月17日)

Fig. 1 Dynamic of groundwater table at Qiwangmu waterlogged lowland

地下水,加之沟渠内的水流不断入渗补给地下水,使地下水位迅速上升,甚至接近地表,从而出现涝灾。从次年8月下旬~10月中旬,随着汛期的结束、蒸发蒸腾作用的继续及小麦播前水的使用,不断消耗浅层地下水,使地下水位不断下降(见图1)。王寺大洼涝洼地浅层地下水运动的数学模型是:

$$\begin{cases} \mu \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [K_{xx}(h-B) \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [K_{yy}(h-B) \frac{\partial h}{\partial y}] + \epsilon \\ h(x, y, t) |_{t=0} = h_0(x, y) \\ h(x, y, t) |_{\Gamma_1} = h_1(x, y, t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, μ 为潜水含水层的储水系数; h 为地下水水位(m); K_{xx} 、 K_{yy} 为潜水含水层 x 、 y 方向的渗透系数(m/d); B 为含水层底板标高(m); ϵ 为土壤水与地下水交换速率(m/d); $h_0(x, y)$ 为含水层初始水头分布(m); $h_1(x, y, t)$ 为边界水位(m)。用有限单元法求解(1)式可得如下常微分方程组:

$$[A]h + [D] \frac{\partial h}{\partial t} = [f] \quad (2)$$

以土壤水和地下水交换速率 ϵ 为设计变量。显然,用 ϵ 代入(2)式,求得的计算水位 h_i^c 应尽可能逼近观测水位 h_i^o , 所以我们以极小化为目标函数(Objective function)。

$$\min E(\epsilon) = \sum w_i (h_i^c - h_i^o)^2 \quad (3)$$

式中, w_i 是权因子。目标函数(3)应服从下列约束: $|\epsilon| \leq M$; $\epsilon \geq 0$ 或 $\epsilon \leq 0$; $\epsilon^j \geq \epsilon^{j+1}$ 或 $\epsilon^j \leq \epsilon^{j+1}$ 。目标函数(3)及其约束条件构成了一个约束非线性规划问题,可用约束非线性规划方法——可变容差法求解。

表2 王寺大洼涝洼地浅层地下水模拟结果表

Tab. 2 Simulated results for the groundwater at Qiwanmu waterlogged lowland

项 目 Item	1993. 10. 17~1994. 10. 10				1994. 10. 11~1995. 9. 30			
	补 给 Recharge	%	排 泄 Discharge	%	补 给 Recharge	%	排 泄 Discharge	%
侧 向 Lateral	38.4	6.32	21.6	3.77	46.1	7.30	41.3	6.75
沟 渠 Ditch	486.8	80.13	3.2	0.56	513.6	81.38	2.7	0.44
农田入渗 Seepage	82.3	13.55	—	—	71.4	11.31	—	—
农田蒸散 Evapotranspiration	—	—	423.5	73.90	—	—	477.3	78.05
开采量 Pumping	—	—	124.8	21.78	—	—	90.2	14.75
合 计 Total	607.5	—	573.1	—	631.1	—	611.5	—

从1993年10月15日~1995年9月30日研究模拟共分成166个计算时段,计算结果汇总见表2。由表2可知该区浅层地下水补给主要以沟渠补给为主,而排泄则以农田蒸散、开采为主。

2 涝洼地农作物耗水规律

2.1 土壤水分通量法

土壤水运动的连续性方程式:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \quad (4)$$

由上式 z' 至 z 积分, 得:

$$q(z) - q(z') = - \int_{z'}^z \frac{\partial \theta}{\partial z} dz \quad (5)$$

式中, $q(z)$ 、 $q(z')$ 分别是地表以下深度为 z 和 z' 处的土壤水分通量。(5)式称为土壤水分通量方程。各种土壤水分通量法(零通量面法、表面通量法、定位通量法、纠偏通量法等)都是由土壤水分通量方程发展而来。土壤水分通量法的优点是方法简单, 应用方便, 所需要的观测资料也容易取得, 缺点是精度差。究其原因, 在于土壤水分通量方程(5)式、(6)式未有考虑源汇项。依据质量守恒原理, 土壤水连续性方程的正确表达形式是:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} - s \quad (6)$$

土壤水分通量方程则为:

$$q(z) - q(z') = - \int_{z'}^z \frac{\partial \theta}{\partial z} dz - \int_{z'}^z s dz \quad (7)$$

比较(7)式和(5)式可知, (5)式少了根系吸水一项, 由于根系吸水量 S 无法实测, 即未知, 于是研究者干脆忽略根系吸水项 S 。所以, 严格讲土壤水分通量法的应用条件是裸土地或根系带以下的非饱和带。由于上述原因, 将土壤水分通量法应用于长时间序列的农田水分计算分析(如一个水文年或某种作物的整个生育期等), 得到的结果无疑精度低, 可靠性差。对于某些短时间的计算, 如估算降雨入渗量、灌溉水量等, 土壤水分通量法仍不失为一种简单、有效地方法。原因在于这种情况下, q 一般都能达到几个 mm/h, 而 S 最大也不超过 0.4 mm/h, 即 q 大了 S 一个数量级, 忽略 S 的作用不会给计算带来大的误差。

2.2 王寺大洼涝洼地农作物耗水规律分析

用地下水最优识别法和土壤水分通量法求得的作物耗水量见表 3。1993~1994 年、

表 3 王寺大洼降雨补给土壤水量及灌溉水量计算结果

Tab. 3 Soilwater recharge by precipitation and irrigation at Qiwangmu waterlogged lowland

项 目 Item	1993. 10. 17~ 1994. 6. 8	1994. 6. 15~ 1994. 9. 30	1994. 10. 10~ 1995. 6. 10	1995. 6. 15~9. 30
降雨补给土壤的水量(mm) Precipitation	78.7	87.2	48.6	35.4
灌 溉 量(mm) Irrigation	76.4	32.4	125.4	—
毛管上升水量(mm) Capillary water	169.2	153.2	233.2	152.1
土壤水消耗量(mm) Storage change	27.6	—	22.4	—
合 计 Total	399.9	—	429.8	—

1994~1995 年冬小麦产量分别为 7027.5 kg/hm²、8032.5 kg/hm², 那么水分利用率(WUE)分别为 17.57 kg/hm²·mm 和 18.69 kg/hm²·mm。夏季作物生长期正值汛期, 作物的水分利用率不具代表性(本文略)。另外, 1 年中地下水埋深 < 0.5 m 的时间达 45d 以

上。所以,在王寺大洼涝洼地上种植作物,必须考虑该区地势低洼易涝、且受涝时间较长的特点,种植喜水作物如旱稻等,才能保证丰收。从该区水文地质和地貌条件及周围地区的情况看,只要夏季作物播前地下水埋深 $>4\text{m}$,该区夏季作物种植玉米是可行的。

3 结 语

汛期初期,由于涝洼地包气带厚度较小,消耗于湿润包气带所用的水量较少,有利于降水对地下水的补给,随着汛期的进行,这种有利于补给的趋势很快就得到削弱;王寺大洼涝洼地浅层地下水的补给以沟渠补给为主,沟渠补给占总补给量的 80% 以上。排泄则主要表现为地下水通过毛管上升供给土壤水分,尔后以蒸发蒸腾的形式消耗掉,这部分水量 1994、1995 年分别占排泄总量的 73.90% 和 78.05%,另一重要排泄形式是开采,分别占排泄总量的 21.78% 和 14.75%。该区 1993~1994 年冬小麦耗水量为 399.9mm,水分利用率为 $17.57\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$;1994~1995 年冬小麦耗水量为 429.8mm,水分利用率为 $18.69\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ 。

致谢 本文承蒙中国科学院石家庄农业现代化研究所由懋正研究员指正,谨表谢意。

参 考 文 献

- 1 Xue Yuqun and Jacob Bear. Modeling in Groundwater Resource. Nanjing University Press, 1991.

· 征订启事 ·

欢迎订阅 1997 年《生态农业研究》

订阅 1997 年《生态农业研究》每期 4.00 元,全年 4 期 16 元(含邮资)。本刊现有 1993 年、1994 年、1995 年、1996 年合订本均为 16 元(含邮资)。从邮局汇款订购,请寄(050021)河北省石家庄市槐中中路 39 号《生态农业研究》编辑部收(请在汇款单上注明订户邮政编码,并将征订回单寄回本刊编辑部)。从银行汇款订购,收款单位:中国科学院石家庄农业现代化研究所;开户银行:河北省石家庄市工商银行裕华路办事处;帐号:215-02640007-803(银行信汇时,请将征订回单随汇票一并汇出)。

本刊编辑部

《生态农业研究》征订回单(可以复印)

订购单位全称				是否要发票	
详细地址				联系人	
邮政编码		汇款方式	1. 邮局 2. 银行	汇款金额	元
订购册数	1993 年合订本(16 元)	套	1995 年合订本(16 元)	套	
	1994 年合订本(16 元)	套	1996 年合订本(16 元)	套	
	1997 年现 刊(16 元)			套	

●地址:河北省石家庄市槐中中路 39 号《生态农业研究》编辑部

●电话(0311)5818007