

地下水埋深较大条件下井灌区土壤水分动态变化特征

孙仕军^{1,2}, 丁跃元³, 马树文², 刘作新¹, 田 园⁴

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所; 2 沈阳农业大学; 3 北京市水利科学研究所; 4 国家节水灌溉北京工程技术研究中心)

摘 要: 针对 20 世纪 80 年代以来, 北方井灌区农田地下水开采多, 补给少, 地下水位普遍下降的问题, 通过分析在北京市东南郊水资源试验区连续 4 年土壤水分观测资料, 探讨了平原井灌区地下水埋深较大条件下(超过 6 m) 0~ 3 m 层土壤水分动态变化规律。按春灌期, 雨季和秋末~ 春初三个阶段分析了土壤水分的季节性变化特点。分析表明, 在土壤干旱时期, 农田灌溉或降雨后, 灌水和降雨(小于 80 mm) 主要补充于 0~ 1 m 土层; 雨季, 当表层土壤水分得到一定补充, 又遇较大次降水(100~ 150 mm) 时, 降雨主要被 1.0~ 2.5 m 层土壤所容纳, 田面不会产生径流, 同时地下水位回升幅度较大。研究认为, 0~ 3 m 层土壤对降水有很强的调蓄能力, 雨季平均有 85% 的降水滞蓄其中。因此, 在田间采取一定的拦蓄水措施, 即使在遇到大暴雨(150~ 200 mm) 的情况下, 也可以做到农田地表不产流或少产流, 绝大部分降雨就地拦蓄入渗, 增加土壤水资源量。

关键词: 井灌区; 降雨径流; 地下水; 土壤水动态

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)02-0070-05

1 引言

土壤水是联系地表水和地下水的纽带, 在水资源形成、转化和消耗过程中, 是必不可少的组成部分, 在农业上, 降水或灌溉也只有转化为土壤水才能为作物吸收利用。在干旱半干旱地区, 由于降雨稀少且季节性分配不均, 关于农田土壤水分运动规律与寻求充分发挥降水资源潜力方面以往有过许多研究^[1-5], 但这些研究多侧重于旱作农业区, 且对地下水埋深影响通常不予考虑。

我国从 20 世纪 70 年代开始大规模开发利用浅层地下水。多年来由于干旱少雨, 北方一些农田地下水开采多, 补给少, 致使地下水位不断下降^[6]。由此, 使得包气带土层厚度增加, 土壤蓄水能力明显提高, 据华北部分地区实际观测, 发生次降水 150 mm 左右的大暴雨, 农田基本上不产流, 除少量蒸发外, 绝大部分降雨入渗至土壤非饱和层^[7-10]。本文利用在北京东南郊平原天堂河流域水资源试验区的实验观测资料, 探讨井灌区地下水位埋深较大条件下农田土壤水分动态变化规律, 以期对北方农田特别是为大力发展井灌的地区, 合理开发地下水, 充分利用降雨, 增加土壤水资源, 发展节水农业提供依据。

2 基本资料

试验区位于北京市大兴区南部, 永定河左岸, 系永定河冲洪积平原区, 总面积 422.5 km²。试区多年平均降水量 556.3 mm, 6~ 9 月为雨季, 降水量占全年的 80% 以上。试区包气带岩性多为粉砂土和砂壤土, 部分

地区有深度和厚度不同的粘土夹层。从 1981 年开始, 试区无地表水供给, 农田灌溉依靠开采地下水, 成为纯井灌区。经普查, 到 1994 年, 试区地下水位埋深已达到 7~ 13 m。

3 土壤含水率沿不同深度土壤变化特点

试区在半壁店汛雨利用试验小区建有土壤水分观测点, 利用 503DR 型中子仪和负压计定期观测 0~ 3 m 层土壤水分动态变化, 自 1991 年起到 1995 年共取得土壤水分观测资料 4 年。试区典型土壤剖面如图 1 所示, 在 0~ 3.4 m 土层深度观测范围内, 由于粘土夹层的存在, 该地区土壤含水率变化特点较均质土壤有一定差异(图 2)。

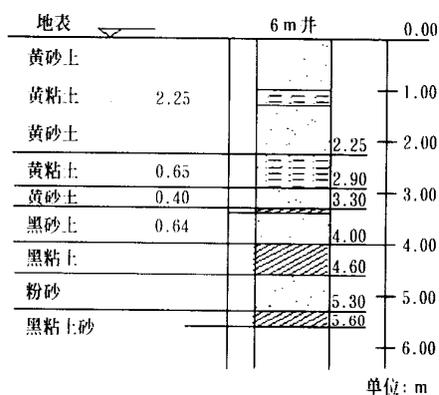


图 1 试区典型土壤剖面图

Fig 1 Typical soil profile in experimental area

按土壤含水率随深度变化特点, 将地面以下 3 m 厚度的土壤分为 3 层, 即 0~ 1 m、1~ 2 m、2~ 3 m 三个层次, 讨论不同深度土壤含水率随季节的变化关系。

根据图 2, 0~ 1 m 土层, 由于在自然条件下受蒸发和入渗双重影响大, 一年中土壤含水率处于经常性的波动状态, 通常在 2 月中旬~ 3 月中旬土壤含水率达到最低值, 7~ 9 月份达到最高值; 在降雨或灌水及其间隔期

收稿日期: 2002-08-08 修订日期: 2003-01-20

基金项目: 北京市科委重点资助计划(854501100); 国家高技术研究发展专项(节水农业阜新示范区(2002AA 2Z4321)); 辽宁省科技攻关重中之重“节水栽培技术研究”项目

作者简介: 孙仕军, 讲师, 在职博士生, 主要从事农业水资源综合利用和节水灌溉方面科研工作。沈阳市东陵路 120 号 沈阳农业大学水利学院, 110161。Email: sunshijun2000@yeah.net

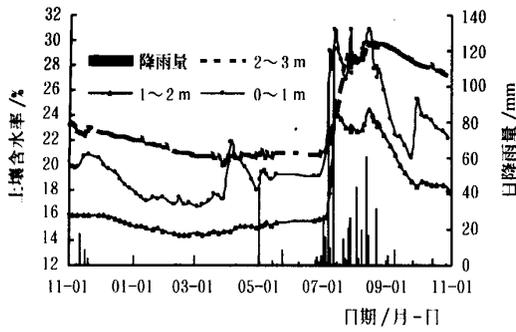


图 2 不同深度土壤含水率年季变化过程 (1993 11~ 1994 11)

Fig 2 Dynamic variations of soil moisture in different depths of soil

间, 土壤水分增减幅度很大, 明显高于 1~ 2 m、2~ 3 m 土层, 变幅范围为 4% ~ 12%。各年度中, 1~ 2 m、2~ 3

m 土层土壤含水率变化规律基本一致, 雨季土壤水分升高, 秋冬季节土壤水分稳步消减, 消减速度明显低于 0~ 1 m 土层。由于 0~ 1 m、2~ 3 m 层土壤较 1~ 2 m 层土壤粘重(1~ 2 m 深度内土壤主要成分为砂土), 故 1~ 2 m 层土壤含水率在各年度始终低于 0~ 1 m、2~ 3 m 土层。

4 土壤水分的季节性动态变化特征

试验观测期间, 1992、1993 年属枯水年, 降水量分别为 400 & 359.4 mm; 1994、1995 年降水量偏丰, 分别为 751.2、624.5 mm; 这几年观测得到的试区土壤水分变化规律具有一定代表性。分析土壤水分随季节变化特点, 在一个年度内, 土壤水分动态可分为春灌期土壤水分波动阶段, 雨季土壤水分剧烈变化阶段, 和秋末~ 春初土壤水分缓慢消减三个阶段(图 3 土壤含水率为 3 m 深土层平均值)。

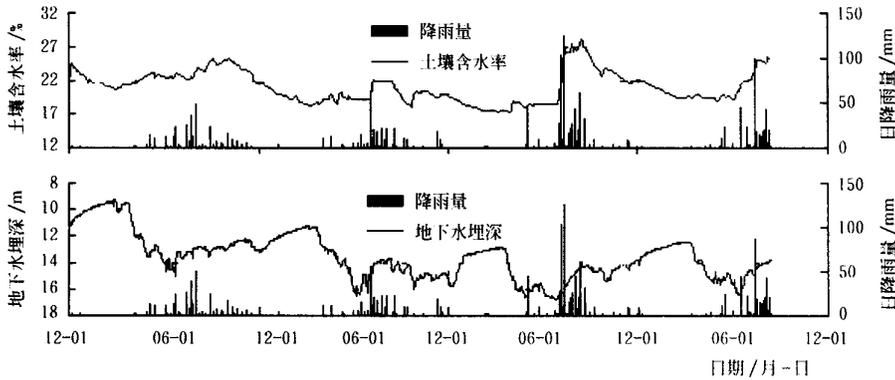


图 3 降水—土壤水—地下水年季变化过程(1991 12~ 1995 12)

Fig 3 0~ 3 m depth soil moisture, groundwater and rainfall dynamic variations from Dec , 1991 to Dec , 1995

4.1 春灌期土壤含水率变化特征

每年 3 月中旬至 5 月底春灌期间, 通常降雨少, 此间空气干燥, 气温逐渐升高, 土壤蒸腾蒸发旺盛, 由于受灌水的影响, 浅层土壤含水率时有波动, 但波动次数不多且变幅较小, 一般在 4% 以内。灌水后一两天, 0~ 1 m 层土壤含水率便可达到较高值, 随着水分入渗过程的开始, 1~ 2 m、2~ 3 m 层土壤水分逐渐增加, 此后 0~ 1 m 层土壤含水率在蒸发和入渗双重作用下逐渐下降。这一阶段称为土壤干旱失墒期。同时由于抽取地下水进行灌溉, 春灌结束即雨季来临前, 试区地下水位通常处于年内最低值。

下面以 1994 年 3 月底冬小麦一次灌水前后测得的土壤水分数据, 分析春灌期灌水对土壤水分动态的影响(图 4)。灌溉前后(02-14~ 04-15 期间)试区降水总计为 2.2 mm。

根据土壤墒情, 试区农田于 1994 年 3 月 29 日灌水约 60 mm, 之后 5 日, 即 4 月 4 日, 经测, 观测点 0~ 1 m、1~ 2 m、2~ 3 m 层土壤平均含水率分别达到 21.80%、16.67% 和 20.71%, 各层土壤含水率增值分别为 4.5、2.0 和 0.6 个百分点, 这说明在无前期降雨的

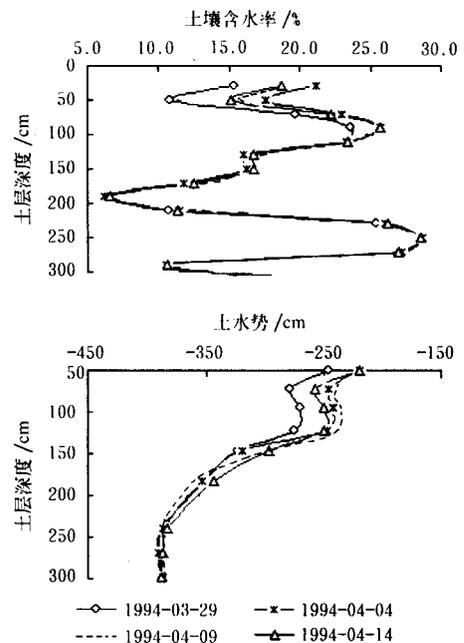


图 4 1994 年春灌期间土壤水分变化剖面图
Fig 4 Variations of soil water storage during the spring irrigation season in 1994

条件下(田间灌水前 20 日无降雨过程),土壤在接受灌水时期,水分主要补充于土壤上部 0~ 1 m 层,1 m 以下土层接受灌入水入渗补给量逐渐减少,2 m 以下土层含水率的增加幅度很小。

4.2 雨季土壤含水率变化特征

试验区 80% 以上的降水发生在雨季 6~ 9 月份,这一时期 3 m 层土壤含水率出现剧烈波动。每场降雨过后,土壤含水率随之上升,然后,由于该时期气温高,土壤和作物蒸腾蒸发强烈,随着土壤表面蒸发失水,含水率很快下降,循环往复,直至雨季结束。由图 2、图 3,不难看出雨季为土壤蓄墒期,同时,该时期由于降水入渗补给,地下水位开始回升。

1) 以 1995 年 6 月中旬一次孤立降雨为例,分析降雨前后土壤水分的变化

1995 年 6 月中旬前后,试区降水过程如表 1。

表 1 试验区 1995 年 6 月 2~ 26 日降雨过程统计

Table 1 Rainfall process in the experimental area from June 2~ 26, 1995

日期/月-日	06-02	06-12	06-13	06-16	06-17	06-25	合计
降雨量/mm	0	0.1	0.2	45.2	27.1	0.4	73

根据试验,6 月 9 日~ 6 月 14 日间,土壤表层 0~ 0.5 m 含水率呈消减状态;0.5~ 1 m 土层含水率呈交替变化;1~ 2 m 土层土壤含水率提高了 0.28%;2 m 层以下至 3 m 层土壤含水率提高了 0.02%,增幅微弱。产生上述情况的主要原因是 5 月下旬以来,一直没有降雨,土壤干旱,到 6 月初小麦有一次灌水过程所致。上述土壤水分变化过程跟前述灌水后土壤水分变化是一致的。

到 6 月 16、17 日,试区连续降雨 72.3 mm,此后第 3 天即 19 日,测得 0~ 1 m 层土壤含水率明显增加,比雨前 14 日测定值提高了 3.32 个百分点。1~ 3 m 土层含水率也在增长(图 5),其中 1~ 2 m 层含水率增加了 0.58%,2~ 3 m 层增加了 0.27%,可见在此雨量级下 1 m 以下土层,由于入渗滞后,含水率增幅呈递减趋势。

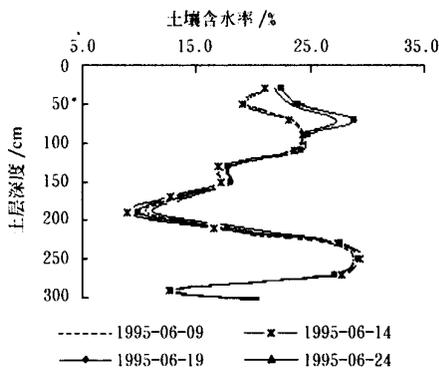


图 5 1995 年雨季土壤水分变化剖面图
Fig 5 Variation of soil water storage in the rainy season of 1995

6 月 17 日到 6 月 24 日期间无降雨,0~ 1 m 层土壤含水率开始消减,但 1 m 以下土层含水率仍保持缓慢增长。

上述分析可以发现,在土壤比较干旱的情况下,次降雨 80 mm 以内,0~ 1 m 土层含水率上升变化值最大,降雨主要滞蓄于该层内。

2) 以 1994 年 7 月上旬几次连续较大降雨为例,分析降雨前后土壤水分的变化

1994 年 6 月 29~ 7 月 13 日半个月,试验区共发生 6 次降雨过程(表 2),其中有两次暴雨过程,出现在 7 月 7 日和 7 月 12 日。

表 2 试验区 1994 年 7 月 2~ 12 日降雨过程统计

Table 2 Rainfall process on July 2~ 12, 1994 in the experimental area

日期/月-日	07-03~ 03	07-05	07-07	07-08	07-11	07-12	合计
降雨量/mm	46.9	20.7	106.5	10.1	16.6	132.5	333.3

1994 年 7 月 2、3 两日试区共降雨 46.9 mm,据图 6 中 6 月 29 日及 7 月 4 日两条土壤含水率剖面图,降雨主要蓄存于 1 m 以上土层;之后 7 月 5 日降雨 20.7 mm,7 月 7、8 日降雨 116.6 mm,到 7 月 8 日 0~ 1 m 层土壤含水率猛增,含水率由 7 月 4 日的 21.4% 增至 8 日的 29.18%,增幅 8.04%,变幅达到几年来的最高值;同时 1~ 2 m 土层含水率也有较大幅度提高,增幅近 2%,这说明在 1 m 土层水分得到大量降雨入渗补充后,水分自 1 m 层迅速向下转移,补给下层土壤。

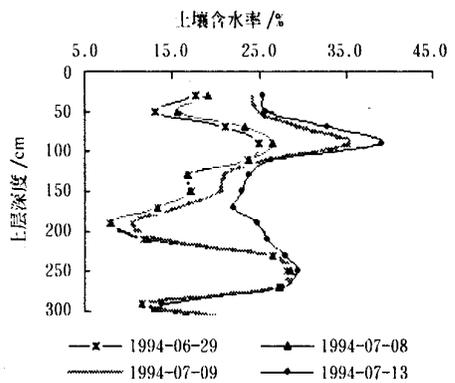


图 6 1994 年雨季土壤水分变化剖面
Fig 6 Variation of soil water storage in the rainy season of 1994

7 月 9~ 7 月 10 日,没有降水过程,由于表层土壤蒸发强烈,0~ 1 m 层土壤水分开始衰减,降幅小于 0.5%,1 m 层以下到 3 m 层土壤含水率略有增加。7 月 11 日降雨 16.6 mm,12 日降暴雨 132.5 mm,由于此前降雨使 0~ 1 m 内土壤含水率接近饱和;到 7 月 13 日测得,0~ 1 m 层土壤含水率增幅 3%,达到 30.8%,几乎饱和;根据 7 月 10 日和 13 日观测结果,暴雨过后,降水主要滞蓄于 1~ 2.5 m 土层内,该层土壤平均含水率达

到 25.40%, 增幅是试验 4 年中最高的。

从 6 月 29 日至 7 月 13 日, 0~3 m 层的土壤含水率增加了 7.99%; 另据田间观察, 7 月 12 日暴雨过程中, 试区大田基本未产流。另据试区半壁店 I-5# 专门观测井的地下水位观测资料, 6 月 29 日地下水埋深为 16.63 m, 经过此间降水后, 7 月 13 日地下水埋深上升为 15.22 m, 地下水位回升了 1.41 m。

根据上述典型实例, 当无前期降雨或前期降雨较小, 土壤比较干旱的条件下, 遇次降雨在 80 mm 左右时, 降雨主要滞蓄在 1 m 土层, 随后该层水分因蒸发和入渗而逐渐减少; 当前期连续降雨较多, 表层土壤已得到大量补充, 又遇较大次降雨(如超过 100 mm 雨量)时, 降雨主要被 1~2.5 m 层土壤所容纳, 田面一般不会产生径流, 同时地下水位回升幅度较大。

表 3 不同降雨年型雨季前后 3m 层土壤含水率及土壤蓄水变化

Table 3 Comparison of soil water content in different rainy years

年份	雨季前		雨季末		雨季末始	时段	雨 季		
	日期	土壤平均含水率/%	日期	土壤平均含水率/%	土壤含水率增加值/%		降雨量/mm (1)	土壤蓄水量累积增量/mm (2)	滞蓄系数/% (1)/(2) × 100
1992-06	中旬	22.39	10月上旬	24.72	2.33	06-20~10-05	333.0	243.2	75.1
1993-06	上旬	19.19	9月下旬	20.12	0.93	06-09~09-29	292.4	237.7	81.3
1994-06	上旬	18.53	9月下旬	23.72	5.19	06-29~09-29	650.4	578.7	88.9
1995-05	下旬	19.35	9月下旬	23.57*	4.22*	06-09~09-29	563.7	433.3*	76.9*

注: 1. * 1995 年为近似值; 2. 计算过程参见文献[11]。

依表中数据, 1992、1993 两年雨季降水量偏少, 跟雨前相比, 雨季后土壤含水率增加值仅为 2.33% 和 0.93%; 而 1994、1995 年雨季后土壤含水率的增加幅度分别达到 5.19% 和 4.22%, 后者增幅是前者的数倍。可见, 干旱年雨季过后, 包气带上部非饱和层土壤水分得到补充少, 而在丰水年土壤水分能得到较多的补充。同时, 由于土壤水入渗补给量增大, 丰水年份地下水位回升效果显著, 不过由于当前地下水埋深较大, 雨季降水对地下水的补给通过深层土壤的滞蓄, 地下水回升一直可以持续到次年春灌前。

6 结 论

1) 试区作为典型井灌区, 其土壤水分动态可分为春灌期土壤水分波动阶段, 雨季土壤水分剧烈变化阶段, 和秋末—春初土壤水分缓慢消减三个阶段。春灌期为土壤干旱失墒期(3~5月), 雨季为蓄墒期(6~9月), 秋末—春初为缓慢失墒期(10~翌年3月)。

2) 非雨季土壤干旱条件下, 农田灌溉或降雨发生后, 灌溉或降水(次雨量小于 80 mm) 主要补充于土壤上部 0~1 m 土层, 1 m 以下土层接受灌水和降雨补给量渐少; 雨季连续降雨较多, 表层土壤水分已得到大量补充, 又遇较大次降雨(如超过 100 mm 雨量)时, 降雨主要被 1~2.5 m 层土壤所容纳, 田面基本不产流, 同时地下水位回升幅度较大。

3) 当前, 北京市平原地区地下水位埋深较大(普遍大于 6 m), 农田在大雨后基本不产流。研究发现, 现实

4 3 秋末~ 春初土壤含水率动态

该时期土壤水分处于缓慢变化阶段。雨季过后 11 月中旬至次年 3 月上旬秋末至春初季节, 通常, 降雨明显减少且基本无灌水(即使有冬灌, 通常灌水量不超过 60 mm), 加之气温低, 蒸发弱, 0~3 层土壤含水率变化幅度不大, 基本维持在相对稳定的状态, 从总体上看呈消减趋势(图 2、3)。通常, 至 3 月初, 随着气温的回升, 冬小麦返青, 农田蒸发量大, 土壤含水率降至全年最低点, 但地下水位通常在春灌前达到年内最高峰。

5 不同降水年型对土壤含水率变化的影响

不同频率降水年里, 受时段内降雨多少的影响, 雨季前后土壤含水率变化差异较大, 为此, 将各年度雨季降水量和雨季前后 0~3 层土壤水分资料统计于表 3。

条件下, 0~3 m 土层具有很强的调蓄能力, 当雨季降水量在 300~650 mm 范围时, 多年平均有近 85% 的雨量滞蓄在 3 m 土层内。据此, 在田间采取一定的拦蓄水措施, 如平整土地, 修筑田埂围埝, 采用深松、深翻的耕作及覆盖措施等, 在遇到大暴雨(150~200 mm)的情况下, 也是可以做到农田地表不产流或少产流, 绝大部分降雨就地拦蓄入渗, 从而增加土壤水资源量。研究非饱和土壤对降水的调控利用对缓解华北平原农业用水紧张和发展节水农业具有积极意义。

致谢: 本文在资料整理过程中得到北京市水利科学研究所薛松教授和曹波的指导和帮助, 在此致谢!

[参 考 文 献]

- [1] 张利, 张彩英, 彭春香. 沧州地区发展蓄水工程的研究[J]. 农业工程学报, 1988, (4): 22~29
- [2] 王砦田, 徐祝龄. 半干旱偏旱地区土壤水分变化规律及提高降水利用率的措施[J]. 北京农业大学学报, 1993, 19(2): 31~40
- [3] 龚学臣, 杨立廷, 牛瑞明. 冀西北风沙半干旱区农田土壤水分动态分析[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 88~91
- [4] 杨兴国, 柯晓新, 张旭东等. 甘肃河东雨养农业区土壤水分变化规律的研究[J]. 应用气象学报, 2000, 11(2): 205~212
- [5] 严昌荣, 居辉, 彭世琪等. 中国北方旱农地区农田水分动态变化特征[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 11~14
- [6] 全国地下水情报网. 第七届全国地下水科技交流会议纪要

- [J]. 地下水, 2000, (1): 1~ 4
- [7] 丁跃元, 薛松. 北京市平原典型地区地上水地下水联合运用的试验研究[R]. 北京市水利科学研究所, 1994. 12
- [8] 方生, 陈秀玲. 地上水地下水联合运用实现灌区多目标综合管理[J]. 地下水, 1999, 21(2): 79~ 83
- [9] 薛松, 石凤才. 防水患与兴水利[A]. 全国地下水信息网编. 地下水开发利用研究与实践[C]. 北京: 中国农业出版社, 1999. 8: 24~ 29
- [10] 孙仕军, 丁跃元, 田园等. 典型井灌区利用土壤和地下水水库调蓄汛期径流的研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(2): 190~ 195
- [11] 孙仕军, 丁跃元, 曹波等. 平原井灌区土壤水库调蓄能力分析[J]. 自然资源学报, 2002, 17(1): 42~ 47.
- [12] 雷志栋, 杨诗秀, 倪广恒等. 地下水埋深类型与土壤水分动态特征[J]. 水利学报, 1992, (2): 1~ 6

Soil moisture dynamic characteristics in well irrigation areas in Beijing Plain with comparatively deep ground water tables

Sun Shijun^{1,2}, Ding Yaoyuan³, Ma Shuwen², Liu Zuoxin¹, Tian Yuan⁴

(1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 3. Beijing Hydraulic

Research Institute, Beijing 100044, China; 4. National Center of Efficient

Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing, Beijing 100044, China)

Abstract Groundwater resources have been used with growing intensity since the 1980s in the Northern Plain of China due to lack of water. As a result, the farmland groundwater level has decreased and the storage capacity of soil has increased accordingly in the well irrigation areas. It is necessary to take measures to reduce the loss of surface flow and evaporation and to use flood and runoff water to recharge the local groundwater. Four year data on rainfall, groundwater and soil moisture from the water resources experimental area in the south-eastern suburb of Beijing were processed in order to study the dynamic characteristics of soil water under the condition of a deep groundwater table. This data was divided into three phases for each year—the period of spring irrigation, the rainy season and the period of the end of autumn to the beginning of next spring, in order to analyze the dynamic characteristics of soil moisture in different seasons. The analysis showed that during the dry season the watering or precipitation (< 80 mm) was primarily stored in 0~ 1 m soil layer. During the rainy season, when the top soil is relatively damp, if a rainstorm (100~ 150 mm) occurs the water will be primarily stored in 1~ 2.5 m soil layer without surface flow appearing. The research showed that the soil reservoir had very good regulation capacity and 85% of the normal annual precipitation was stored in the 3 m soil (named soil reservoir). Therefore if appropriate measures are taken on farmland before a heavy rainstorm occurs, then there will be minimal runoff appearing and most of the precipitation will be stored in the soils.

Key words: well irrigation area; rainfall and runoff; groundwater; soil water dynamic state