

考虑生态径流过程的运行模式对文峪河梯级水库综合效益的影响

石建军, 冯民权

(西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要:生态流量控制与水库其他效益之间的矛盾是河流生态流量保障实践运行的最大障碍,协调生态保障与水库既得利益间的平衡关系是开展面向河流健康的水库调度的重要前提。本研究以河流生态需水过程为生态控制目标,结合文峪河梯级水库的运行需求,划定不同阶段的多目标寻优秩序,并据此建立梯级水库多目标调度模型。依据不同水平年来水状况及远景年的相应措施,设置不同调度情景进行梯级水库模拟调度,得到不同情景下的梯级水库调度方案。最后,对方案中梯级水库的供水保证率、发电量、生态保证率等指标进行统计对比,分析无、低限、适宜三个生态流量控制下的文峪河梯级水库综合效益统计指标的变化规律。研究结果显示:(1)三个生态流量约束限制,对下游的城镇与工业用水影响不大,其保证率高达 99.39%。(2)对灌溉用水而言,由于将生态流量优先权设置在灌溉用水前,对农田灌溉用水的影响是客观存在的,农田灌溉用水的保证率随生态流量的增加,有所降低,适宜生态流量控制方案较不考虑生态约束方案,保证率下降了 10%,且很多枯水年份,破坏的月份达到了 8 个月,即一年中大部分月份不能满足灌溉需求,可见其破坏程度以及其潜在的经济社会影响不容小视。(3)三个方案下泄的生态水量都较多,且水量过程差别不大,但生态水量下泄多发生在灌溉用水满足的时段。(4)由于城镇工业用水、农业用水以及生态用水都是从下游取水,其变化对发电量的影响较小。且实施最小生态控制情况下,梯级水库的强制下泄水量有所减少,为柏叶口和文峪河水库间的补偿调节,提供了更多的空间。通过联合运用,在保障下泄水量要求的情况下,柏叶口相对增发,使梯级总发电量增大,并略高于其他两种方案。

关键词: 水库调度;多目标;生态流量控制;效益分析
中图分类号: S273.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)02-0222-06

Wenyuhe cascade reservoirs running with considering ecological runoff process and its impact on reservoirs original comprehensive benefits

SHI Jian-jun, FENG Min-quan

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: The conflict between the ecological flow control and other reservoir benefit is regarded as one of biggest obstacles to develop river ecological flow security. Balancing their interests is great significative to take river health into reservoirs practice operation. The paper selected river ecological water requirement process as ecological control target of reservoirs operation, and compared it with other object benefits depending on their significance in different operation time. An order or rule of multi-objective optimization was put forward for building a cascade reservoirs simulation model on Wenyu River. In addition, combining with the supply and demand status and some possible measures on the different level years, it given a series of scenarios based on ecological flow requirements to conduct the simulating operation of cascade reservoirs model. According to the simulating computation under different requirements, many scheduling schemes and its corresponding statistical indicators were got, such as water supply reliability, power generation and ecological assurance. Comparing these indicators from these schemes, we can know the benefit impact on cascade reservoirs operation after considering ecological flow control.

Keywords: Reservoir scheduling; multiple objects; ecological flow control; efficiency analysis

以改善生态系统健康状态和恢复河流生命为目标的河流水资源调控由来已久。早在 20 世纪 60 年代,人们就从实践中逐步认识到河流水资源开发利用对生态环境造成的影响,并开展关于水利工程对生态与环境不利影响的研究。1973 年第 11 届国际大坝会议,首次聚焦大坝对下游河流环境影响,掀起了河流生态水文研究的热潮。特别是 90 年代以来,水文系统与生态系统间的相互作用关系、水利工程等人类活动对自然水文系统规律的影响等相关研究迅速发展,并成为国际水科学领域的重要研究内容^[1-2]。依据研究成果的所属领域,可将其划分为两个范畴:一是对调度方式优化以及配套技术设施的研究;二是评估实施这些技术方法对生态与环境的影响,以在保证改善效果的同时不至于对生态系统产生明显扰动。所采用的主要技术方法主要包括短期和长期的观测与评价,数学模型模拟和预测等^[3]。

近几年,面向生态友好的水库调度模型在我国发展迅猛,在调度协调准则、生态控制影响、生态调控模型求解方法等领域有了较为深入的研究^[4-16],对生态调控中涉及生态目标的设定、多目标优先次序等关键问题都提出了切实可行的解决方案。本文以河流生态需水过程为依据,结合水库的功能需求,建立梯级水库多目标联合调度模型。模型将供水、灌溉、发电、生态为追求目标,其中生态目标分为基础目标和适宜目标,并依据其不同的重要性进行分期目标排序,作为多目标寻优过程中的基本准则。依据不同水平年来水状况及远景年的相应措施,设置不同的调度情景进行梯级水库的模拟调度,得到不同情景下的梯级调度方案。而后对方案中的上下游水库的供水保证率、发电量、生态保证率等指标分别进行统计分析,对比补偿调节前后的各统计指标的变化。

1 研究区概况

文峪河为汾河的一级支流,发源于山西省吕梁市交城县关帝山,流经交城、文水、汾阳,于孝义市梧桐乡南姚村东汇入汾河,河道全长 155 km,流域面积 4 090 km²。多年平均水资源总量为 3.83 亿 m³,其中地表水为 2.34 亿 m³,地下水为 2.67 亿 m³。文峪河是山西省吕梁地区的重要水源地之一,承担了交城、文水、汾阳和孝义平川四县市、近 50 万人口的供水任务,在整个吕梁区域安全保障体系中占有极其重要的战略地位^[17]。因此,文峪河梯级水库(文峪河水库与柏叶口水库)的下泄过程直接关系到

吕梁地区水资源安全与生态安全问题,涉及到该地区的经济发展战略实施的全局。

文峪河水库坝址位于汾河支流文峪河出山口处。该库是以防洪,灌溉,城市工业用水,兼发电,养殖等综合利用的大型水库。水库总库容 1.166 亿 m³,其中防洪库容 0.26 亿 m³,兴利库容 0.402 亿 m³。控制流域面积 1876 km²,灌溉面积 1.2 万多 hm²。柏叶口水库位于山西省吕梁市交城县会立乡柏叶口村上游约 500 m 的文峪河干流上,控制流域面积 875 km²,距下游已建的文峪河水库约 30.7 km,设计总库容 1.28 亿 m³,其中兴利库容 1.13 亿 m³,防洪库容 0.21 亿 m³,属大(二)型水库。其任务是以城市生活和工业供水、配合文峪河水库防洪为主,兼顾提高现有灌区的灌溉保证率、发电等综合利用。

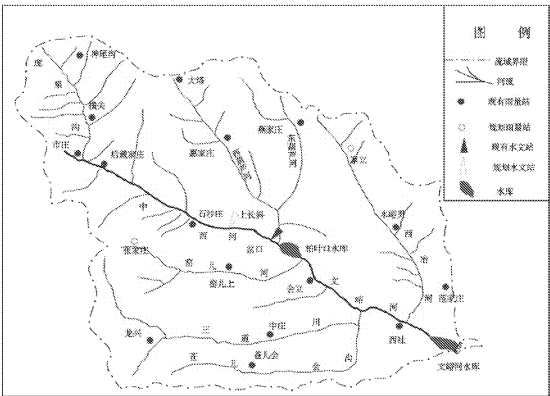


图 1 文峪河上游示意图

Fig.1 Map of the upper Wenyu River basin

2 生态径流过程获取

然而受气候变化和人类活动的影响,很多河流的水文序列都发生了不同程度的变异,径流资料的一致性难以保障,这使得很多原有的生态需水分析方法在变化环境下不再适用。针对水文序列变异对生态流量推求的影响,笔者提出水文频率法与生态水深流速法结合起来推求生态径流过程。该方法的思路是通过变异点识别方法确定整个水文序列的变异点位置,并以变异前的水文序列为基础数据,通过水文频率法计算河流生态流量。同时为了避免水文频率法在刻画生物生态需求缺乏物理基础这一问题,文中采用水深流速法对水文频率法的结果进行修正,使其具有河流生态系统宏观水文需求规律的同时,满足指示生物的生存需求。

以文峪河水库坝址处 1971 年以前的近天然水文序列为基础,以鲤鱼为生态指示物种,1965 年的河道断面为计算断面,应用水文频率法与生态水深

流速法对文峪河水库坝下的最小生态径流和适宜生态流量过程进行推求,计算结果如下。

表 1 文峪河水库坝下生态径流过程/(m³·s⁻¹)
Table 1 Environmental flow demand on Wenyuhe reservoir damsite

月份 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
适宜生态径限 Lower limit of suitable ecological flow	4.39	4.39	4.60	3.08	2.39	2.39	4.20	4.14	3.99	3.99	4.39	4.39
最小生态径流 Minimum ecological flow	0.06	0.33	3.91	2.03	1.10	0.13	0.27	1.78	0.77	0.39	0.52	0.09

这里最小生态径流主要是维持河流生态系统基本运行(或指示生物生存)的最小流量,而适宜生态流量指维持河流生态系统良好运行(或指示生物生存)的适宜流量。

3 模型建立与目标协调准则

3.1 模型建立

依据文峪河梯级水库的综合利用要求,其供水要求依次为确保城镇生活用水、保证改善河道生态基流、兼顾工业、灌溉用水。由于文峪河流域属于水资源紧缺地区,故文峪河梯级水库下游的城市生活和工业用水保证率设为 95%;农业灌溉供水保证率设为 50%。据此建立文峪河梯级水库联合调度模型如下:

发电量最大目标函数:

$$\begin{aligned} \max E_{\text{cascade}} &= \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N E_{i,t} \\ &= \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M N_{i,t} \times \text{period} \end{aligned} \tag{1}$$

式中, E_{cascade} 为梯级总发电量; $E_{i,t}$ 为第 i 个水电站在第 t 时段的发电量; $N_{i,t}$ 为第 i 水电站在第 t 时段的出力; period 为时段长(s)($\text{period} = 3600 \times 24 \times 30.4 = 2626560$); T 为时段(月)(1952—2006) 总数目($T = 12 \times 55 = 660$); M 为梯级中水库总数目($M = 2$)。

约束条件:

以城市生活、工业用水以及最小生态基流设置为强约束,适宜生态径流以及灌溉用水设置为弹性约束,除此之外梯级水库联合调度模型中还包括一些基本约束,如梯级水库间水力联系约束、水库水量平衡约束、水库水位约束、水库最大下泄流量约束、水电站装机容量约束、水轮机过机流量约束、变量非负约束。模型求解采用改进粒子群算法^[4]。

3.2 协调机制:

补偿调度规则:为充分利用水源,采用上、下游水库联合运用方式,汛期:柏叶口水库作为文峪河水库的补偿调节水库,即先用文峪河水库蓄水及区间

来水供给生态、城市生活和工业及灌溉用水,不足部分由上游柏叶口水库补充;非汛期:在不增加弃水的条件下,利用文峪河水库空出库容进行反调节,使上游柏叶口水库尽可能均匀放水,以尽量稳定水库电站的发电,并增加其发电量。

目标协调机制:根据供水要求,按照确保城镇生活与工业用水、保证改善河道生态流量、兼顾灌溉用水的顺序。生态目标分别以最小生态径流过程、适宜生态径流为基准,计算不同生态约束情境下的文峪河梯级水库的综合利用情况。

重要参数设置:城镇及工业供水按照 4 400 万 m³ 控制,农业灌溉用水按照下游灌区的多年平均水平进行控制,渠道利用系数取 0.585。

4 计算结果与分析

模型运算中,分别以适宜生态流量过程和最小生态流量过程进行生态基流保障控制。其优先等级设置于城镇与工业用水之后,农业灌溉用水之前。由于城镇与工业用水和农业灌溉用水都是坝下取水方式,下泄流量经过渠首后,两部分水将被引出河流,因此生态流量过程与其余两部分流量不予重合,即下泄的城镇与工业用水和农业灌溉用水无法充当生态基流保留在河流中。

4.1 供水过程分析

通过对不同方案(不考虑生态、最小生态控制、适宜生态控制)的模拟计算,分别得到不同方案下的城镇工业供水量、生态供水量及农田灌溉水量,如下表 2 所示。

表 2 反映了不同调度方案下,柏叶口和文峪河梯级水库向下游的供水量。由表可知,是否考虑生态流量约束的要求,下游的城镇与工业用水均可完全保证。对灌溉用水而言,最小生态流量控制方案下其供水量最大,这是由于受最小生态流量控制的影响,柏叶口和文峪河的发电计划发生改变,增加对灌溉时段的泄水量,故其可用于灌溉的量大于不考

虑生态约束的情况。三个方案的生态水量都较多,且差别不大。但由于泄放时段不同,要甄别其效果,还需综合考虑各个时段的泄水是否满足生态要求,即考察生态破坏率。

表 2 不同调度方案的供水量/(10⁴ m³)

Table 2 water supply of Wenyuhe cascade reservoirs in three schemes

方案 Scheme	供水量 water supply for cities and industry	灌溉量 Irrigation water	生态水量 Ecological water
不考虑生态 No limit by ecological flow	4400.00	3881.96	38643.62
最小生态流量控制 Limit by minimum eco- logical flow	4400.00	3920.00	38605.58
适宜生态流量控制 Limit by suitable eco- logical flow	4400.00	3527.99	38997.59

由图 2 所示,最小生态流量控制和适宜生态流量控制下,生态水量的过程基本是一致的,而农田灌溉用水则发生了较大的变化,适宜生态流量控制下灌溉用水的满足率明显低于最小生态流量控制方案。故可推定两个结论:(1) 生态水量下泄多发生

在灌溉用水满足的时段,这与来水过程的不匹配有关。(2) 将生态流量控制设置在灌溉用水前,对农田灌溉用水的影响是客观存在的,且随着生态流量的增加,影响也趋大。

4.2 供水保证程度

由于年来水不同,相同的生态水量方案下,其对农田灌溉用水的影响也是不同的。因此我们进一步统计了不同用水功能的破坏率,如图 3。

最小生态流量控制方案下,城镇与工业用水的破坏极少,55 年中只在 2001 年和 2004 年发生,这与不考虑生态约束的情况是相同的。将两者的灌溉破坏情况进行对比,我们可得到最小生态流量的控制使灌溉用水的破坏时段有所增长。可见虽然最小生态流量的控制方案提高了灌溉用水的量,但是却降低了灌溉的保证率。

为了反映不同方案的综合情况,将三种方案的破坏次数与保证率分别进行分析,如表 3 所示。其中,生态用水的破坏,是根据生态流量控制等级的不同分别评价,即以最小生态流量方案以最小生态流量标准衡量,确定其生态破坏率,适宜生态流量方案以适宜生态标准衡量,确定其生态破坏率。得到如下结果。

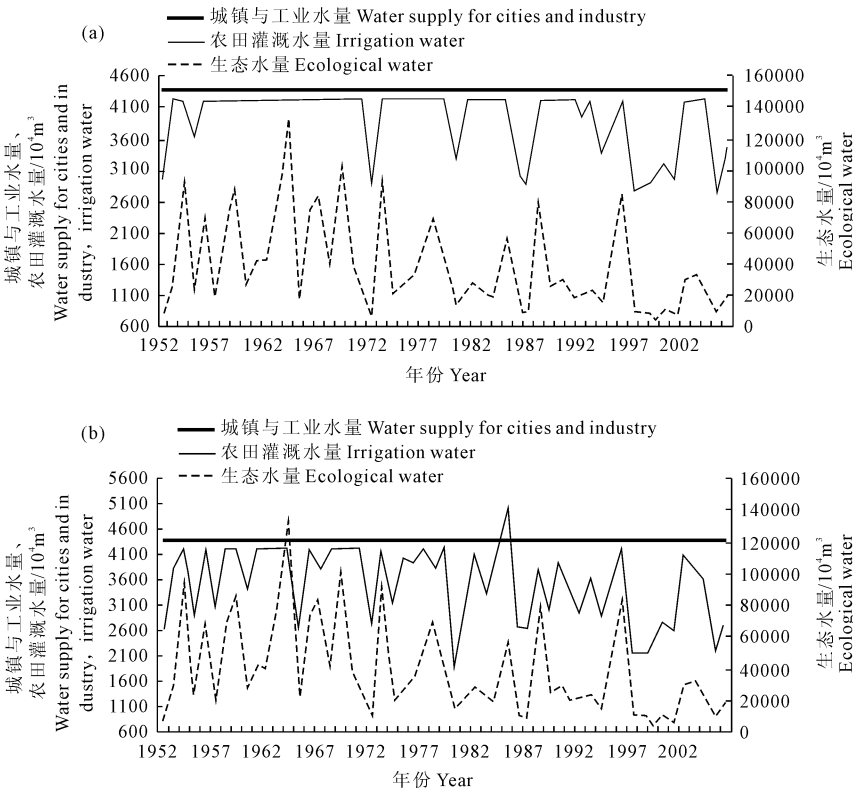


图 2 最小生态流量(a)与适宜生态流量(b)控制下的供水过程

Fig.2 Water supply process of Wenyuhe cascade reservoirs under two controls with minumum eco-flow(a) and suitable eco-flow(b)

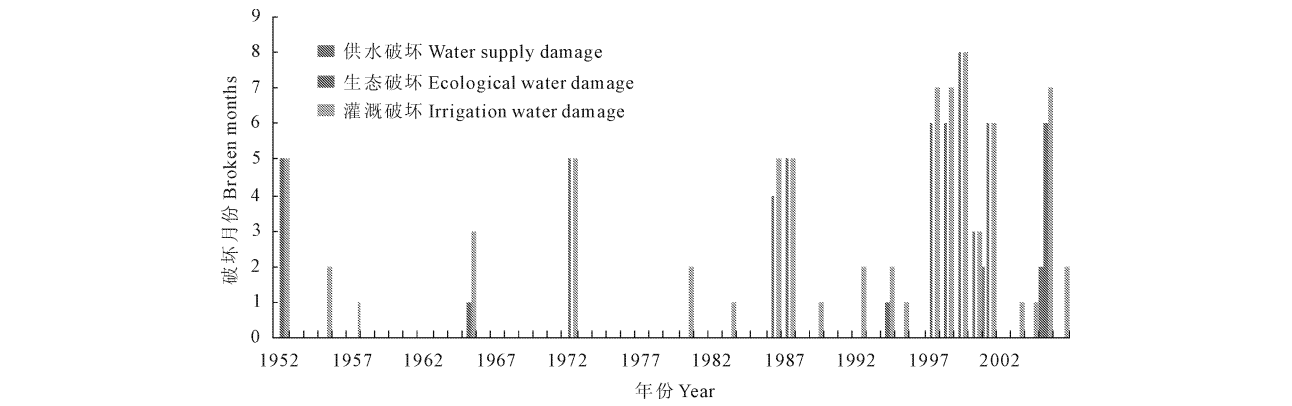


图 3 最小生态流量控制方案下不同功能用水的破坏情况统计

Fig.3 Destruction rate of different water demands under the min-eco-flow control

表 3 三种方案的破坏次数与保证率

Table 3 Destruction number and assurance rate of three schemes

方案 Scheme	城镇与工业供水 Water supply for cities and industry		生态用水 Ecological water		农田灌溉用水 Irrigation water	
	破坏月份数 Broken months	保证率 Assurance coefficient	破坏月份数 Broken months	保证率 Assurance coefficient	破坏月份数 Broken months	保证率 Assurance coefficient
不考虑生态 No limit by ecological flow	4	99.39%			53	91.97%
最小生态流量控制 Limit by minimum ecological flow	4	99.39%	56	91.52%	77	88.33%
适宜生态流量控制 Limit by suitable ecological flow	4	99.39%	81	87.73%	138	79.09%

由表 3 可以看出,由于处于第一优先等级,城镇与工业用水受生态用水变化的影响基本为零,其保证率高达 99.39%。农田灌溉用水的保证率随生态流量的增加,有所减少,适宜生态流量控制方案较不考虑生态约束方案,保证率下降了 10%,且很多枯水年份,破坏的月份达到了 8 个月,即一年中大部分月份不能满足灌溉需求,可见其破坏程度以及其潜在的经济社会影响不容小视。

4.3 发电量统计

对比不同调控方案下,发电量的变化范围,具体数据如表 4。

由表 4 数据可知,由于城镇工业用水、农业用水以及生态用水都是从下游取水,因此对发电的影响较小。从表格中的数据可看出,实施最小生态控制情况下,相比较其他两个方案,其梯级水库的强制下泄水量有所减少,为柏叶口和文峪河水库间的补偿调节,提供了更多的空间。通过联合运用,在保障下泄水量要求的情况下,柏叶口增发,梯级总发电量增大,略高于其他两种方案。

表 4 不同方案下的发电量统计(万 KWh)

Table 4 Power generation of three schemes

调度方案 Scheme	柏叶口 Baiyekou reservoir	文峪河 Wenyuhe reservoir	梯级水库 Cascade reservoir
不考虑生态 No limit by ecological flow	1942.962	1934.842	3877.8
最小生态流量控制 Limit by minimum ecological flow	1954.308	1933.903	3888.211
适宜生态流量控制 Limit by suitable ecological flow	1942.962	1934.545	3877.507

5 结 论

通过对文峪河梯级水库不同生态控制模式下的模拟运算,可知不控制、最小生态流量控制和适宜生态控制模式下,文峪河梯级水库的供水量、保证率以及发电量都发生了变化,其中以适宜生态流量控制下的变化最为强烈,且主要体现在农灌水量和农灌保证率方面。而最小流量控制和不考虑生态控制的结果较为相近,在农灌水量和发电量上还有所增加。

可见,现阶段文峪河梯级水库实行以最小生态流量为基本控制要求的多目标调度是比较切合实际的,一方面生态控制不会过大的影响梯级水库在供水、农灌、发电领域的既得利益,同时又可对灌水量和梯级发电量产生正面的影响。

参 考 文 献:

[1] Boulton A J. An overview of river health assessment: philosophies, practice, problems and prognosis[J]. *Freshwater Biology*, 1999,41: 469-479.

[2] Bednarek A T. Undamming rivers: A review of the ecological impacts of dam removal[J]. *Environmental Management*, 2001, 27(6): 803-814.

[3] Nakayama M. Post-project review of environmental impact assessment for saguling dam for involuntary resettlement[J]. *Ingernational Journal of Water Resources*, 1998, (14):217-290.

[4] 张洪波. 黄河干流生态水文效应与生态调度研究[D]. 西安:西安理工大学,2009.

[5] Tortajada C. Environmental impact assessment of water porjects in mexico[J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2000, (16):73-87.

[6] Richter B D, Baumgartner J V, Power H J. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174.

[7] Richter B D, Wamer A T, Meyer J L, et al. A collaborative and adaptive process for developing environmental folw recommendations [J]. *River research and Applications*, 2006, (22):297-318.

[8] 陈启慧,夏自强,郝振纯,等. 计算生态需水的 RVA 法及其应用[J]. *水资源保护*, 2005, 21(3):4-11.

[9] Hughes E A, Hannart P. A desktop model used to provide an initial estimate of ecological instream flow requirements of rivers in South Africa[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, (270):167-181.

[10] George F M. Models and realities of reservoir operation[J]. *Water Resources Planning & Management*, 2009, (135):57-59.

[11] Williams A, Lansey K, Washburne J. A dynamic simulation based water resources education tool[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(1):471-482.

[12] 王好芳,董增川. 基于量与质的多目标水资源配置模型[J]. *人民黄河*, 2004, (6):7-9 .

[13] 董哲仁. 水库多目标生态调度[J]. *水利水电技术*, 2007, 38(1): 28-32.

[14] 梅亚东,翟丽妮,杨 娜. 生态友好型水库调度控泄方案的评价[J]. *武汉大学学报*, 2008, 41(5):10-13.

[15] 胡和平,刘登峰,田富强,等. 基于生态流量过程线的水库生态调度方法研究[J]. *水科学进展*, 2008, 19(3):325-332.

[16] 翟丽妮,梅亚东,李 娜. 水库生态与环境调度研究综述[J]. *人民长江*, 2007, 38(8):56-60.

[17] 山西省水利水电勘测设计院. 柏叶口水库初设报告[R]. 太原:山西省水利水电勘测设计院,2010.

(上接第 205 页)

4 结论与讨论

通过以上模拟分析可得出如下结论:

1) 沟灌土壤水分入渗湿润锋推进与垄沟参数、土壤性质等有关,相同入渗量下砂质粘壤土水平向湿润锋推进要快于粘土,但竖向湿润锋推进速度恰恰相反。

2) 相同灌水量情况下砂质粘壤土灌水停止后水分再分布时间要小于粘土,但其水平与竖直向湿润锋的扩张距离均大于粘土。

3) 设计灌水定额情况下,砂质粘壤土合理垄宽 20~50 cm,粘土合理垄宽为 20~35 cm,粘土垄宽小于砂质粘壤土。

参 考 文 献:

[1] 林同保,宋雪雷,孟战赢,等. 不同灌水量对垄作小麦水分利用及产量和品质的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2007, 41(5): 123-127.

[2] 边金霞. 春小麦垄作沟灌节水栽培技术[J]. *甘肃科技*, 2008, 24(20):169-170.

[3] 王旭清,王法宏. 小麦垄作栽培技术的肥水效应及光能利用率[J]. *山东农业科学*, 2002, (4):3-5.

[4] 邓 忠. 固定道耕作结合垄作沟灌对河西走廊春小麦水分利用的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学,2005.

[5] 张永久. 河西绿洲灌区春小麦垄作栽培产量效应及其影响机制的研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2006.

[6] 邓 斌. 河西绿洲灌区不同耕作方式下春小麦土壤水分动态变化与产量效应研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2007.