

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.04.011

小浪底水利枢纽大坝变形特性及成因分析

李立刚

(小浪底水利枢纽建设管理局,河南 郑州 450000)

摘要 阐述小浪底水利枢纽大坝的结构特点及变形特性,对大坝变形进行监测,监测结果表明,各监测点变化连续、平顺、无突变,且逐渐趋于稳定,但相同高程的下游测点位移量大于上游测点位移量。分析大坝变形成因,认为时效是引起大坝变形的主要因素,而引起大坝不均匀变形的主要因素包括水库初次蓄水、水位骤降、坝体分区材料差异、河床深覆盖层、施工速率快和库水作用力等。通过与设计值对比、工程类比以及对正常蓄水位变形量的预测分析认为,坝体变形不影响大坝安全稳定运行。

关键词 不均匀变形;初次蓄水;水位骤降;坝体材料;覆盖层;施工速率;小浪底大坝

中图分类号 :TV698.1 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2009)04-0039-05

Analysis of properties and causes of deformation of the Xiaolangdi Hydro Project dam//LI Li-gang(*Construction and Management Bureau of Xiaolangdi Multipurpose Project, Zhengzhou 450000, China*)

Abstract :The structural characteristics and deformation properties of the Xiaolangdi Hydro Project dam are described. The dam deformation was monitored and results show that measuring point displacement is continuous, smooth, and without mutation, and gradually turns out to be stable. At the same elevation, the measuring point displacement downstream is larger than it is upstream. Through analysis of deformation causes, it is suggested that age is the main factor causing recovered deformation. The main factors causing uneven deformation include initial water storage, rapid drawdown, material differences in the dam area, the deep overburden of the riverbed, rapid construction, and water force. Based on the value of design, engineering analogies and prediction analysis of deformation with normal water levels, the deformation does not affect the safe and stable operation of the dam.

Key words :uneven deformation; initial storage; rapid drawdown; dam body materials; cover; construction speed; Xiaolangdi Dam

1 大坝结构及特点

小浪底水利枢纽大坝(以下简称小浪底大坝)为壤土斜心墙堆石坝,最大坝高 160 m,坝顶长度 1 667 m,坝顶宽 15 m,坝底最大宽度 864 m。上游坝坡为 1:2.6,下游坝坡为 1:1.75,在下游坝坡 220.0 m 和 250.0 m 高程处分别设有 14 m 和 6 m 宽的马道,上游围堰作为大坝的一个组成部分,位于大坝上游坝踵。壤土心墙下部为斜心墙,最大底宽为 101.9 m,250 m 高程以上过渡为正心墙,顶宽为 7.5 m。

大坝坐落在河床深覆盖层上,河床深覆盖层最大深度超过 70 m,且存在夹砂层及大型孤石。大坝总填筑方量为 5073 万 m³,由 17 种填料组成,每种填料均有特定要求,其中 1 区、1A 区、1B 区、5 区和 10 区为防渗料,2A 区、2B 区、2C 区为反滤料,3 区为

过渡料,4A 区、4B 区、4C 区为坝壳堆石料,6A 区、6B 区、7 区为护坡料,8 区为压戥料,9 区为坝基回填砂砾石料。大坝典型剖面如图 1 所示。

2 大坝变形特性

2.1 一般变形特性

小浪底大坝布置 8 条视准线进行位移监测,其中上游坡 3 条、下游坡 3 条、坝顶上下游侧各 1 条。大坝于 2000 年 11 月填筑完成,坝顶上下游 2 条 283 视准线于 2001 年 3 月开始观测,2 条 283 视准线至 2006 年底各测点水平位移测值过程线如图 2 所示,垂直位移测值过程线如图 3 所示。由图 2、图 3 可以看出,2 条 283 视准线变化规律一致,各测点变化连续、平顺、无突变,呈现出河床最大坝高处(B-B 剖面)位移量大、向两岸逐渐减少的趋势,累计变化量

作者简介:李立刚(1969—),男,河北赵县人,高级工程师,从事枢纽运行管理工作。E-mail:xlldlg126.com

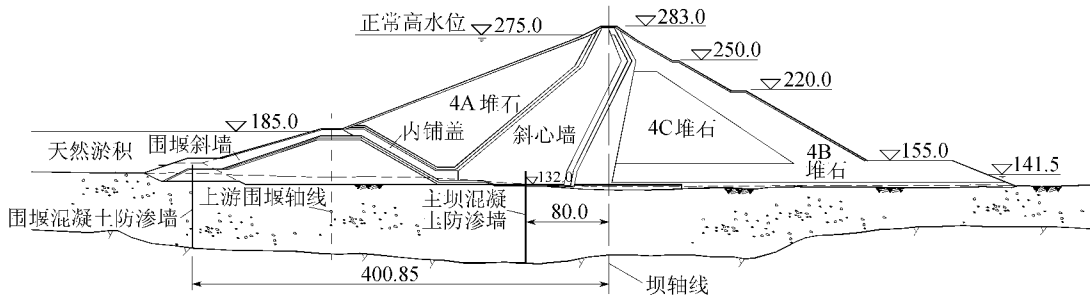
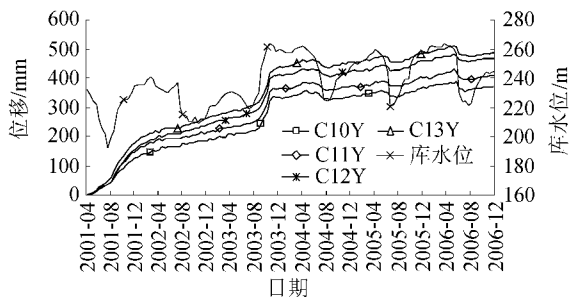
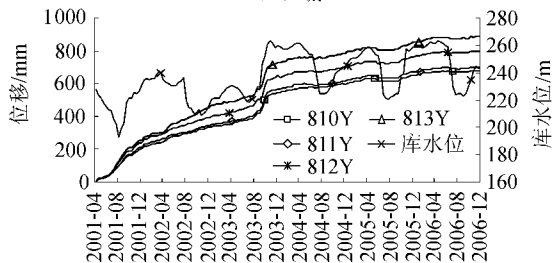


图1 小浪底大坝典型剖面(单位:m)

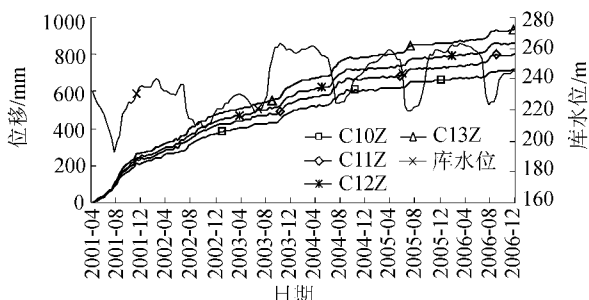


(a)上游

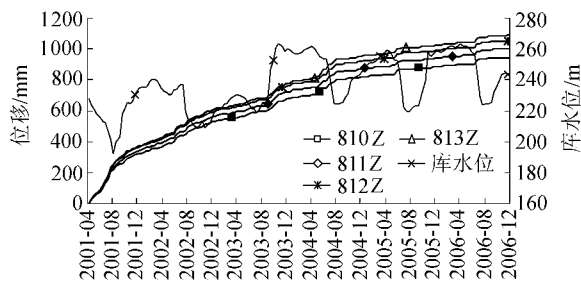


(b)下游

图2 上、下游283视准线水平位移测值过程线



(a)上游



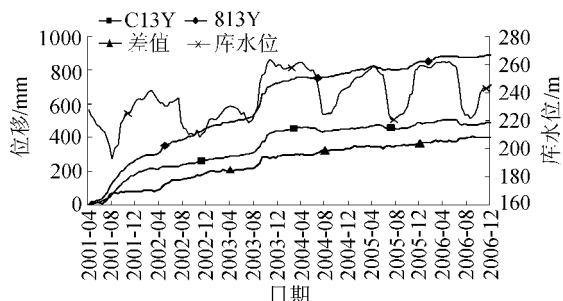
(b)下游

图3 上、下游283视准线垂直位移测值过程线

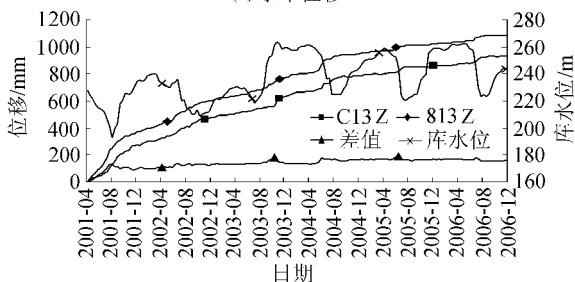
逐年增加,表现为水平位移向下游方向、垂直位移向下沉陷的变化规律,但年度变化量呈逐年减少趋势,大坝变形渐趋稳定,符合土石坝变形的一般规律^[1]。

2.2 不均匀变形

小浪底大坝不均匀变形表现为相同高程的上下游测点水平位移和垂直位移均存在一定差值,下游侧测值大于上游侧测值,尤其以水平位移更明显。选取大坝最高B-B断面上游283视准线C13测点、下游283视准线813测点组成测点对,其位移差值代表大坝不均匀变形的最大值,2个测点的水平位移、垂直位移及位移差值如图4所示。由图4可以看出,上下游侧累计水平位移和垂直位移随时间推移而逐渐增大,但下游侧位移大于上游侧位移;上下游水平位移差值呈逐渐增大的趋势,2006年底最大水平位移差值为413.4mm,月平均变化量为5.99mm;2003年10月首次高水位期间水平位移差值明显增大,2004~2006年库水位下降期间上游侧水平位移恢复大于下游侧,差值有所增加;上下游侧垂直位移不均匀变形比水平位移小,且位移差值已渐趋稳定,2006年底最大垂直位移差值为158.4mm,月平均变化量为2.29mm。



(a)水平位移



(b)垂直位移

图4 最大位移测点水平位移、垂直位移测值及差值过程线

3 大坝变形成因分析

3.1 时效为大坝变形的主要影响因素

大坝变形主要由水位、温度和时效 3 个分量组成,将不可恢复或演进变形量与水位、温度等条件引起的可恢复变形区分出来,建立安全监控数学模型^[2-3]对监测数据进行定量分析。分析结果显示,所有测点的水平位移和垂直位移都呈增加趋势,后期速率变缓,基本保持平稳,说明大坝变形趋于稳定,同时变形主要受时效分量的影响,受水位分量和温度分量的影响较小。

根据数学模型对下游 283 视准线 813 测点位移进行回归分析可知,测点水平位移时效分量为 838.79 mm,占水平位移总量 895.5 mm 的 93.67%,其他分量占 6.33%,垂直位移时效分量为 1 032.5 mm,占垂直位移总量 1 093.2 mm 的 94.45%,其他分量占 5.55%。由此可见,时效为大坝变形的主要影响因素^[4]。

3.2 初次蓄水到新高水位对大坝变形的影响分析

初次蓄水到新高水位时,由于土体的塑性,新增荷载对土体产生不可恢复变形是一次性的。同时,上游坝壳由于水的首次浸泡作用使其强度、变形、饱和度和等材料参数发生较大改变,土体产生的湿陷、流变作用较为明显。而再次蓄到相同水位时对材料性质的改变及重复施加水荷载,新增的变形就会很小。

由图 2 和图 3 可以看出,2003 年水库初次蓄水到新高水位时,视准线测值过程线出现变形突增现象,而其他阶段变形的速率基本平稳。2003 年受华西秋雨影响,库水位从 230.23 m(2003 年 8 月 26 日)上升到 265.69 m(2003 年 10 月 15 日),远远超过以前库水位的最高值 240.87 m(2002 年 3 月 1 日),坝体变形在这一期间增加较快。坝顶上游 283 视准线 C13 测点和下游 283 视准线 813 测点位移变化见表 1。从表 1 中可以看出,初次蓄水到新高水位,大坝变形有一个突变,且水平位移变化量大于垂直位移变化量。初次高水位期间(2003 年 8~10 月),水平位移占全年位移量的 53%~61%,垂直位移占全年位移量的 30%~31%;水平位移月均变化量为全年月均变化量的 2.11~2.45 倍,垂直位移月均变化

表 1 初次蓄水对大坝变形的影响统计 mm

位移形式	部 位	2003 年		初次高水位期间 (2003 年 8~10 月)	
		变形总量	月均变形量	变形总量	月均变形量
水平位移	上游 283 测点 C13	172	14.3	105	35.0
	下游 283 测点 813	272	22.7	144	48.0
垂直位移	上游 283 测点 C13	163	13.6	50	16.7
	下游 283 测点 813	174	14.5	52	17.3

量为全年月均变化量的 1.19~1.23 倍^[5]。在之后 3 年的蓄水过程中,未超过历史最高水位,测点位移变化平稳(表 2)。

3.3 水库水位骤降对大坝变形的影响分析

当库水位上升时,整个坝体受到库水推力作用都是向下游变形,当库水位骤降时,由于心墙上的水荷载迅速减小,心墙向下游的变形得到一定的恢复,并挤压上游坝壳使上游坝壳的变形也得到一定的恢复,而下游坝壳因心墙位移带动的变形恢复作用并不明显,即上游侧坝体位移的水位分量大于下游侧,从而使坝体产生不均匀变形。

小浪底水库每年汛前进行集中调水调沙运用,库水位下降较快,如图 2 和图 3,坝顶上下游 283 视准线最大剖面测点水位骤降期间的位移变化如表 2 所示。从表 2 中可以看出,水位骤降对大坝上游侧的影响量大于对下游侧的影响量,对水平位移的影响量大于对垂直位移的影响量;2004~2006 年上游侧水平位移向下游方向移动,年内月均变化量为 1.1~2.8 mm,平均为 1.96 mm(向下游方向位移),但在水位骤降期间水平位移指向上游,向相反方向移动,月均变化量为 10.5~24 mm,平均为 15 mm(向上游方向位移);下游侧水平位移向下游方向移动,年内月均变化量为 3.6~5.7 mm,平均为 5.1 mm(向下游方向位移),但在水位骤降期间水平位移指向上游,向相反方向移动,月均变化量为 3.0~9.0 mm,平均为 6.5 mm(向上游方向位移);2004~2006 年上游侧垂直位移年内月均变化量为 5.7~11.0 mm,平均为 7.5 mm(下沉),但在水位骤降期间月均变化量为 21.0~37.0 mm,平均为 33.5 mm(下沉),为年内月均平均值的 4.47 倍;下游侧垂直位移年内月均变化量为 5.7~15.0 mm,平均为 8.9 mm(下沉),但在水位骤降期间月均变化量为 17.5~44.0 mm,平均为

表 2 水库水位骤降对大坝位移影响统计 mm

位移形式	部 位	2004 年		2005 年		2006 年	
		月均位移量	水位骤降期月均位移量	月均位移量	水位骤降期月均位移量	月均位移量	水位骤降期月均位移量
水平位移	上游 283 测点 C13	+1.1	-10.5	+2.8	-10.5	+2.0	-24.0
	下游 283 测点 813	+5.3	-3.0	+5.7	-7.5	+3.6	-9.0
垂直位移	上游 283 测点 C13	+11.0	+32.5	+5.7	+21.0	+5.9	+37.0
	下游 283 测点 813	+15.0	+44.0	+6.2	+17.5	+5.7	+24.8

注:水平位移向下游方向为“+”,向上游方向为“-”;垂直位移下沉为“+”,上抬为“-”。

28.7 mm(下沉),为年内月均平均值的 3.22 倍^[6]。

3.4 筑坝材料对大坝变形的影响分析

心墙与坝壳材料之间或不同分区的坝壳材料之间的压缩特性及填筑指标的差异可导致坝体产生不均匀变形。小浪底大坝堆石体统称 4 区料,其中上游坝壳堆石料为 4A 料,因其位于水下和水位变动区,全部开采自石门沟料场,控制粉砂岩和黏土岩的质量分数不大于 5%;下游坝壳水下部位和坝壳坡面堆石料为 4B 料,因要求有较强的抗风化能力,控制软岩质量分数不大于 10%;下游坝壳水上部位堆石料为 4C 料,为任意料区,控制软岩质量分数不大于 20%,如图 1 所示。4C 料位于下游坝壳的中上部,直接支承心墙料,由于斜心墙坝的体形特点,在自重和库水推力的联合作用下,大坝坝顶势必出现朝向下游的水平位移和弯曲变形,且下游侧堆石 4B 和 4C 材料弱于上游侧 4A 料,其软化和徐变性能均高于 4A 料,增大了坝顶水平位移和弯曲变形趋势,使坝顶的拉伸变形得以放大。

3.5 河床深覆盖层对大坝变形的影响分析

根据勘测资料,小浪底大坝基础约有 420 m 宽坐落在砂卵石覆盖层上,该覆盖层一般厚 30~40 m,最厚处达 70 多 m。在地质结构上,坝基部位自上而下依次为表砂层、上部砂砾石层、夹砂层、底砂层和底部砂砾石层。表砂层厚 3~7 m,为疏松中密砂层,在开挖时已将其挖除;上部砂砾石层厚度为 30~45 m,含砂率一般为 20%~30%,干密度为 2 200~2 350 kg/m³,呈密实状态;夹砂层分布厚度为 1~10 m,干密度为 1 550~1 650 kg/m³;底砂层在河床深槽内呈条带状分布于上部砂砾石层以下,厚度为 20~25 m,平均干密度为 1 690 kg/m³;底部砂砾石层腹部在深槽最底部,厚度为 5~10 m,干密度一般为 2 200~2 350 kg/m³。

小浪底大坝高 160 m,填筑方量为 5 073 万 m³,砂卵石层深 70 m,其压缩系数为 $1.7 \times 10^{-8} \sim 4.1 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$,通过计算,坝基沉降量为 248.27 cm,由此加剧了大坝的沉降变形。

3.6 施工速率对大坝变形的影响分析

小浪底工程于 1997 年 10 月实现大河截流,1998 年 8 月开始河床部位坝体填筑。合同要求大坝 1999 年 6 月 30 日前全线填筑至 200 m 高程,实际上大坝已于 1999 年 4 月 5 日填筑到该高程,较合同工期提前了 86 d;合同要求 2000 年 6 月 30 日前大坝填筑至 236 m 高程,实际上大坝于 1999 年 10 月 8 日已填筑到该高程,较合同工期提前了 266 d;合同要求 2001 年 8 月 2 日前大坝填筑至 280~282 m 高程,实际上大坝已于 2000 年 6 月 26 日填筑到该高程,

较合同工期提前了 402 d。大坝从高程 236.00 m 填筑至 282.00 m,月平均填筑量为 112 万 m³,平均月填筑高度为 6.33 m,最高月填筑量为 158 万 m³,相应升高 8 m/月。大坝以较快的速度上升,缩短了坝体填筑施工期的沉降量,增加了竣工后的变形量,是造成坝体不均匀变形的原因之一。

3.7 库水作用力对大坝变形的影响分析

小浪底大坝的防渗体采用斜向下游的壤土心墙,与直心墙不同,斜心墙如一根斜置的悬臂梁,本身就存在朝向下游的水平位移和弯曲变形。同时,低透水性的壤土斜心墙形成了一个近于完整的隔水层,承担了几几乎所有的库水推力作用,并将库水推力传递到下游坝壳,从而导致下游坝壳承受的水平推力和竖向荷载均大于上游坝壳。在这部分水平推力和竖向荷载以及下游坝壳本身自重作用下,下游坝壳的瞬时弹塑性变形、长期流变变形都将大于上游坝壳,由此,斜心墙向下游的水平位移和弯曲变形大于上游侧^[7]。

4 大坝变形分析评价

4.1 设计值与实测值对比

在大坝设计阶段,根据坝基、心墙及堆石 $e \sim p$ 曲线,采用分层总和法计算坝基及坝体的沉降量,计算结果见文献[8]。在大坝竣工后至 2006 年底,实测坝顶上游侧 283 视准线 C13 测点最大沉降量为 88.1 cm,与计算值 81.75 cm 接近。大坝竣工后实际沉降量与设计值接近,说明大坝运行状态与设计运行状态相符。

4.2 工程类比

根据土石坝竣工后沉降资料分析,若沉降量超过坝高的 1% 时,则大坝易产生裂缝。国内外部分超过 100 m 高的大坝沉降资料见表 3^[4],由表 3 可以看出,坝体竣工后的沉降量多数小于坝高的 1%,一般在 0.2%~0.5% 之间。至 2006 年底,小浪底大坝坝体沉降量为 1 093 mm,约为最大坝高的 0.68%,沉降值与其他大坝基本相当。

表 3 国内外 100 m 以上心墙坝在竣工后的沉降

编号	坝名	国别	坝高 H/m	年数/ a	沉降 S/cm	沉降 (S/H)/ %
1	碧口	中国	105.3		18.7	0.18
2	鲁布革	中国	103.8		18.4	0.18
3	库加尔 (Cougar)	前苏联	136	3	40	0.30
4	御母衣	日本	131	9	60	0.46
5	阿科松博	前苏联	106		82	0.73
6	肯尼 (Kenny)	加拿大	104	9.5	60	0.60

4.3 正常蓄水位下大坝变形预测分析

将水位、温度和时效等因子组成回归方程,采用逐步回归法预测大坝变形的发展。从预测结果看,在首次蓄到水位 265 ~ 270 m 和 270 ~ 275 m 新高水位阶段,坝体的水平位移发展速率会进一步增大,垂直位移变化较小,坝顶视准线最大剖面测点水平位移分别增加 71.9 mm 和 81.0 mm,且变形不均匀程度也会随之增加,位移差增量分别为 38.2 mm 和 44.8 mm。在水位达到 275 m 之后,坝体变形主要按照时效分量趋势发展,除去首蓄因子的影响,最大位移点的年变幅不到 60 mm,而位移差值的年变幅不到 40 mm,大坝变形逐渐趋于稳定^[4]。

5 结 语

小浪底大坝变形分析结果表明,各测点变化规律一致,过程线连续、平顺、无突变,累计位移变化量逐年增加,表现为水平位移向下游方向、垂直位移下沉的变化规律,大坝变形渐趋稳定,符合土石坝变形的一般规律。

大坝坐落在河床深厚覆盖层上、坝体结构复杂、填筑材料种类多和填筑速度快等,使坝体变形产生差异性和不协调性,是导致坝体不均匀变形的内在因素。库水位升降变幅大及水库初次蓄水等是促进大坝不均匀变形的外在因素。

小浪底大坝预留 2 m 的超高填筑量,通过分析认为目前不均匀变形不影响大坝的安全稳定运行,

同时,加强大坝安全监测工作,尤其在水库水位超过历史新高水位和水位骤升骤降期间,宜加密监测,确保大坝安全稳定运行。

参考文献:

[1] 小浪底工程咨询有限公司.小浪底工程外部变形监测年报[R].郑州:小浪底工程咨询有限公司,2007.

[2] 郭海庆,吴中如,杨杰.堆石坝变形监测的灰色非线性时序组合模型[J].河海大学学报:自然科学版,2001,29(6):51-55.

[3] 方卫华,王润英.大坝变形监测自动化系统进展[J].水利水电科技进展,2000,20(6):23-25.

[4] 中国水利水电科学研究院.小浪底水利枢纽斜心墙堆石坝计算分析[R].北京:中国水利水电科学研究院,2007.

[5] 小浪底水利枢纽建设管理局,黄河勘测规划设计有限公司.小浪底水利枢纽初期运用技术自评估报告[R].郑州:小浪底水利枢纽建设管理局,2006.

[6] 李立刚,李占省.小浪底水库调水调沙运用对大坝变形的影响分析[J].大坝与安全,2007(2):28-31.

[7] 水利部水利水电规划设计总院,中国水利水电科学研究院.黄河小浪底水利枢纽初期运用技术评估报告[R].北京:水利部水利水电规划设计总院,2007.

[8] 水利部黄河水利委员会勘测规划设计研究院.小浪底水利枢纽蓄水安全鉴定设计自检报告[R].郑州:水利部黄河水利委员会勘测规划设计研究院,1999.

(收稿日期 2008-10-07 编辑:方宇彤)

(上接第 26 页)降低,限制区域的农业生产用水,影响农业水价的进一步调整,但是,采用高效节水技术的节水成本必然进一步增加用水户的水价负担,这将使基于节水水价的用水户水价对灌水量的效应分析、水价承受力分析和水价补偿机制研究成为塔里木河流域未来农业水价调整的重要研究内容。

参考文献:

[1] 裴源生,方玲,罗琳.黄河流域农业需水价格弹性研究[J].资源科学,2003,25(6):27-30.

[2] 毛春梅.农业水价改革与节水效果的关系分析[J].中国农村水利水电,2005(4):2-4.

[3] 于素花.农村社区水价变化对农业节水技术推广的影响[J].农业技术经济,2006(6):26-29.

[4] 孙建光,韩桂兰.塔里木河流域未来农业水价进一步调整的理论分析[J].水利经济,2008,26(2):37-38.

[5] 孙建光,韩桂兰.塔里木河流域未来农业水价调整中水资源费计价模型[J].水利水电科技进展,2008,28(4):76-79.

[6] 雷志栋,胡和平,杨诗秀,等.叶尔羌河灌区冬小麦灌溉试验与分析[J].灌溉与排水,1999,18(2):30-33.

[7] 胡和平,杨诗秀,段新杰,等.叶尔羌河灌区棉花灌溉试验与分析[J].灌溉与排水,1999,18(2):34-37.

[8] 王光谦,魏加华.流域水量调控模型与应用[M].北京:科学出版社,2006.

[9] 李曦,段永红,雷海章.水价及农产品价格对农民利润最大化的影响[J].中国农村水利水电,2005(4):17-20.

(收稿日期 2008-09-23 编辑:骆超)

