

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2017. 05. 004

都江堰工程思考及其启示

王芳芳^{1,2}, 吴时强¹

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:分析都江堰工程的水力学原理、规划管理理念和人文思想,认为都江堰工程自动分水排沙、泄洪引水的水力学原理和反映在规划管理上的科学哲理,以及天人合一、可持续发展的人文思想,能给人们以水利工程建设以至人类发展模式的启示。
关键词:都江堰;水力学原理;规划管理;人文思想
中图分类号:TV87 **文献标识码:**A **文章编号:**1004 - 6933 (2017)05 - 0019 - 06

Reflection and enlightenment of Dujiangyan Project

WANG Fangfang^{1,2}, WU Shiqiang¹

(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: This paper analyzed the hydraulic mechanism, planning management notion and humanistic thought of Dujiangyan project, and thought that the project is a wonderful combination of the hydraulic mechanism of automatic water distribution, sand discharge and flood diversion. Besides, the project has also displayed scientific philosophy in its planning management, the humanistic thought of the harmony between man and nature, and the concept of sustainable development, which may give us some enlightenment for the construction of water conservancy project and human development pattern.
Key words: Dujiangyan Project; hydraulic mechanism; planning management; humanistic thought

战国末年(公元前 256—前 251 年),秦国蜀郡守李冰兴建都江堰工程。该工程坐落于成都平原西部的岷江上,沟通了成都平原和岷江、长江的联系。都江堰渠首枢纽由鱼嘴、飞沙堰、宝瓶口以及百丈堤、金刚堤、人字堤等部分组成,最终达到了自动分水、排沙、泄洪、稳定引水的目的(图 1)。2 200 多年来,都江堰在防洪、灌溉、改善环境、繁荣文化、促进经济社会发展等方面,造福人民,荫及子孙,成就了成都平原物产丰富、人杰地灵“天府之

国”的美誉^[1]。
都江堰工程以鱼嘴分水工程、飞沙堰溢洪排沙工程、宝瓶口引水工程三大工程完美结合而著称。三大工程因势利导,巧妙地利用水力学原理解决了引水、泄洪和排沙的矛盾。工程本身结构合理,功能健全,蕴含了丰富的规划与管理的理念,为后人留下了一套筑堰治河、引水排沙、维修管理的技术,成为我国乃至世界治水文化一颗经久不衰的璀璨明珠。
都江堰工程引起了众多领域研究人员的关注。

基金项目:国家自然科学基金(51379128)
作者简介:王芳芳(1988—),男,博士研究生,主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail:wff08020102@163.com
通信作者:吴时强,教授级高级工程师。E-mail:sqwu@nhri.com

刘玉泉等^[2]对都江堰三大工程从流体力学原理进行了详细解释;高树有等^[3-5]对都江堰工程发展历史及现状进行了回顾,且对工程的科学价值及布局合理性对水沙控制效果等进行了分析;许志方等^[6]从现代水利科技角度说明了都江堰工程的技术特点及原理;林承坤等^[7]分析都江堰工程能够经久不衰的原因;张倩倩等^[8]探讨了都江堰工程对现代工程项目管理的启示;吴自力^[9]从人力资源管理角度进行了借鉴;李可可等^[10]分析了都江堰工程治水科技与文化的形成与发展。笔者对都江堰主要工程的水力学原理进行分析,从工程布局和功能角度探讨值得借鉴的规划管理理念及人文思想启示。



图1 都江堰渠首工程示意图

1 都江堰工程简介

都江堰工程主要包括鱼嘴、飞沙堰、宝瓶口等众多渠首工程。

鱼嘴工程又称“鱼嘴分水堤”,是都江堰的分水工程,因其形如鱼嘴而得名,其作用是把岷江分成内外二江。西边叫外江,主要用于排洪输沙;东边沿山脚的叫内江,主要用于灌溉,起到一级分水排沙作用。李冰的治水三字经中的“分四六,平潦旱”,“分四六”是对内外江分水比例的概括,通过鱼嘴实现对岷江水量的合理调配:枯水期水流经鱼嘴上面的弯道绕行,主流直冲内江,内江进水量约六成,外江进水量约四成;洪水期水势不再受弯道制约,主流直冲外江,内外江江水的比例颠倒为内江约四成,外江约六成。

飞沙堰工程位于内江下游与外江交汇处,具有泄洪、排沙和调节水量的显著功能。枯水期,飞沙堰阻挡内江水流入外江,将其引入宝瓶口;洪水期,内江多余的水越过飞沙堰流入外江;如遇特大洪水,可自行溃堤,让大量江水回归岷江主流。飞沙堰更重要的功用是利用弯道环流飞沙。

宝瓶口工程起节制闸作用,能自动控制内江进

水量,是前山(今名灌口山、玉垒山)伸向岷江的长脊上凿开的一个口子,是人工凿成控制内江进水的咽喉,其进口高程略高于内江底部高程,以其断面为瓶状而得名,主要用来引水灌溉。合理安排宝瓶口与飞沙堰的位置,可实现都江堰第二级分水排沙的功能。

2 都江堰工程的水力学原理

2.1 “鱼嘴分四六”

内外江水流的主要影响因素是主流线位置和过流断面形状。主流线位置决定了主流方向,弯曲河道主流线的位置具有“低水傍岸,高水居中”的特点,由于内江位于弯道凹岸,外江位于弯道凸岸,随着来流流量的变化,都江堰鱼嘴上游主流线位置横向摆动:枯水期,主流线靠凹岸,内江分水多,利于灌区取水;洪水期,主流线向凸岸靠近,内江分水比例减少,洪水主要由外江宣泄,因此有利于枯水期内江引水、洪水期外江泄洪。过流断面形状可改变流量变化中内外江流量配比(表1),同时在来流变化时,岸坡坡度对内外江流量变化速率的影响也不同。鱼嘴前河道断面呈非对称弯道断面(图2),呈现凹岸侧底坡窄深,凸岸平缓,因此,水位由低到高时,凸岸过水流量变化速率显著大于凹岸,且变化速率相差越来越大,如图3所示:来流增加过程中,外江过流量增加速率始终大于内江,且变化速率的差值呈现先增大后减小的趋势;当岷江来流为1000 m³/s时,内外江流量比例相当,变化速率相近,但当岷江来流达到5500 m³/s时,变化差值达到最大,有利于外江泄洪、内江引水。可见,鱼嘴位置的选定尤为重要,合理鱼嘴位置可按需调节内外江分水比例,使得内江引水“枯而不干,洪而不涝”,达到削峰减谷的效果。

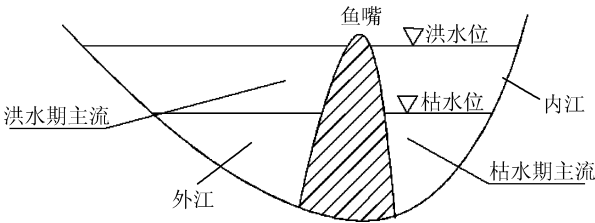


图2 “分四六”原理

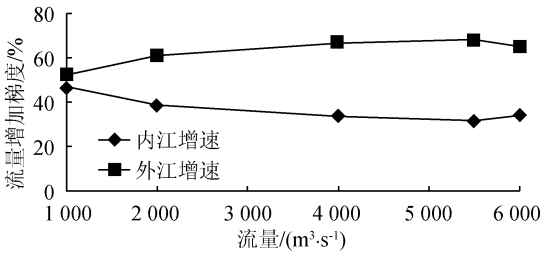


图3 内外江相对流量增加速率

表 1 都江堰渠首工程泄洪流量

岷江流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	内江流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	外江流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	宝瓶口流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	飞沙堰流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	内外江 流量比	飞沙堰占内 江流量比/%	内江占岷江 流量比/%
1 000	550	450	420	130	1:0.82	23.6	55.0
2 000	1 020	980	520	500	1:0.96	49.0	51.0
4 000	1 800	2 200	640	1 160	1:1.22	64.4	45.0
5 500	2 300	3 200	700	1 600	1:1.39	69.6	41.8
5 500	2 300	3 200	520	1 780	1:1.39	77.4	41.8
6 000	2 460	3 540	680	1 780	1:1.44	72.4	41.0
7 000	2 800	4 200	700	2 100	1:1.50	75.0	40.0

注:飞沙堰流量包括水平槽和人字堤的溢流量在内,但所占比例很小;摘自《四川都江堰灌区工程手册》(1993 年)。

2.2 弯道螺旋流

当水流经过弯道时,液体质点受到离心力和重力的共同作用。离心力作用下,凹岸水位抬高,凸岸水位降低,造成水面横比降;重力作用下,水面横比降引起断面横向压力差,这种沿垂线均匀分布的压力差和沿垂线非均匀分布的离心力,叠加形成横向力矩而产生横向环流,此环流与纵向水流结合在一起,形成顺主流方向呈螺旋形向前运动的水流,取横断面的水流流动结构即为横向环流,见图 4(b)。

取水深方向单元水体进行受力分析,水流流经弯道时受到离心力和侧压力共同作用,产生离心力 f_1 ,将横比降公式带入侧压力公式可得侧压力 f_2 。

$$f_1 = \rho u^2 / r \tag{1}$$

$$f_2 = \alpha_0 \rho \frac{v_{cp}^2}{r} + \frac{\tau_{r0}}{h} \tag{2}$$

式中: ρ 为水流密度; u 为流向速度分量; r 为河道曲率半径; α_0 为流速分布系数,可由纵向流速分布求得; v_{cp} 为纵向平均流速; τ_{r0} 为河底横向阻力; h 为水深。

由式(1)~(2)可知,侧压力 f_2 纵向分布均匀,指向凸岸,而 u 纵向分布的不均匀导致离心力 f_1 由底层向表层逐渐增大,指向凹岸。 f_1 与 f_2 的共同作用在河流横断面内产生一个合力矩,导致河流在向前流动的同时伴随有横向环流,横向环流将泥沙石块由凹岸带向凸岸(图 4)。另外,从剖面图横断面合力分布(图 4(b))可以看出,随着流速分布沿水深方向不均匀程度增大,横向力矩增大,排沙能力增加。因此,飞沙堰的排沙作用随泄洪量增加而增强,洪水越大,分流比越高,排沙效果越显著。

2.3 凹岸取水,凸岸排沙

都江堰枢纽区河床为砂卵石淤积层,易冲易淤。岷江进入都江堰河段后,由于内江分流后输沙能力降低及河道比降变缓,卵石推移质沿程淤积,内江河口和飞沙堰对岸的凤栖窝河段淤积尤其严重^[11]。都江堰河段为一天然弯道,特别是内江段处于弯道凹岸侧,水深较深,流速较大,易形成弯道螺旋流。

重力作用下,泥沙在水流中分布也不均匀,表层水流含泥沙较少,底层水流含泥沙较多;由于弯道环流的作用,表层水流动向凹岸,冲刷岸壁沿底层返回,底层水流携带泥沙流向凸岸,从而将底沙上掀至岸坡,造成凸岸淤积(见图 4(b))。宝瓶口处于凹岸,正对含泥沙较少的表层水流,以“正面取水”之势将较清澈的河水引到下游进行灌溉;而处于凸岸的飞沙堰正对底层水流,以“侧面排沙”之势将较浑浊的河水排入外江^[2]。

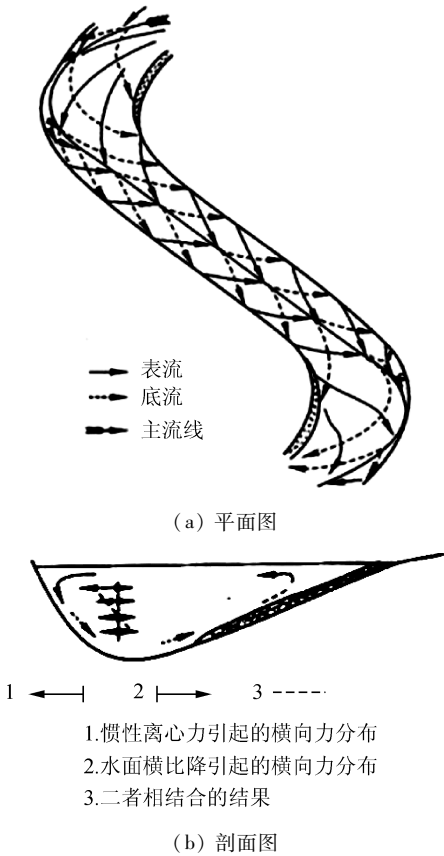


图 4 弯道螺旋流示意图

2.4 两级分水排沙

分水排沙是河流开发利用中很重要的技术难题,都江堰工程布局合理,几大工程相互配合,形成多级分水排沙功效,共同解决了岷江泄洪以及取水排沙的难题。岷江水流从都江堰上游挟沙而来,都

江堰河段床沙级配粒径范围 0.15 ~ 510 mm,级配宽达 4 个数量级^[12],沙粒在洪水期以卵石推移质为主,枯水期以悬移质和较小沙砾为主。鱼嘴将岷江水流分成内江和外江两部分,经过都江堰河段上游自然弯道的淘刷和淤积,将大部分卵石沙砾分到外江宣泄,同时鱼嘴位置的选取决定了内外江分流比,此处为第一级分水排沙。经过鱼嘴一级分水排沙作用,流入内江水流以悬移质和较小沙砾为主,由于内江处于弯道凹岸,根据螺旋流原理,宝瓶口“正面取水”,飞沙堰“侧面排沙”,共同组成第二级分水排沙。一方面,宝瓶口是人工雕琢而成的引水口,其进口底部高程高出内江河底高程,保证了引水质量,进口宽度控制了流量,因此可以第二次调节进入灌区的水沙;另一方面,飞沙堰利用螺旋流原理底部淘沙,合理设计堰高,可以起到第二次排沙和分流的作用。

3 都江堰工程的规划管理理念

鱼嘴、飞沙堰和宝瓶口,无论是结构布局还是功能布局,都是巧夺天工,浑然一体,形成了布局合理的系统工程。鱼嘴分流,飞沙堰排沙,宝瓶口引水灌溉,联合发挥分流分沙、泄洪排沙、引流冲沙的重要作用,过程衔接之完美,配合之默契,可谓浑然天成。都江堰工程巧妙的结构布局和功能无形之中蕴含了许多规划管理的理念。笔者从规划管理的角度分析都江堰工程三大主要工程,旨在挖掘出值得现代规划与管理者可借鉴的几点启示。

3.1 规划三步曲

a. 目标明确,有效结合。都江堰工程集航运、防洪、灌溉于一身,最终目的是惠民。宝瓶口用于引水灌溉和防洪,是工程目的之所在,鱼嘴分流分沙和飞沙堰阻流排沙二者共同保证了引水目标的实现,形成了“宝瓶口引水灌溉—鱼嘴分流分沙—飞沙堰阻流排沙”的“铁三角”关系,最终达到了惠民的目的。

的。从规划角度可引申出“目标明确,有效结合”的理念,只有目标明确,才有前进的方向和动力,才能启动整个项目,此外还需要有效的相互结合的技术和手段作为支撑。

b. 整体规划,调控大局。鱼嘴的主要功能是分水分沙。鱼嘴“分四六”的功能从整体上控制内外江分流分沙比,一定程度上保证了宝瓶口枯水期、洪水期均可以取到水。鱼嘴位于上游,调控了下游内外江水沙量的整体分布,具有关键的决定性作用。对规划者来说,鱼嘴意义在于“整体规划,调控大局”,在目标确定情况下,认真研究各个关键因素的相互关系,确定整体实施方案。

c. 细化调整,伸缩有度。飞沙堰主要用于排水飞沙。李冰治水三字经“深淘滩,低作堰”中,“深淘滩”指每年必须清除内外江底淤积的泥沙,使河床保持一定的深度,保证江水畅流;“低作堰”使飞沙堰高度低于堤岸,以便更好、更有效地发挥溢洪作用,避免造成水灾。这里“低作堰”强调了飞沙堰高度选取的重要性,堰顶高度直接决定飞沙堰协调引水与排沙矛盾功效的发挥。从引水的角度,飞沙堰不能过低,以满足宝瓶口引水灌溉要求;从排沙的角度,飞沙堰也不能过高,使具备排沙的功能。因此,在方案思路已定情况下,在处理具体细节上,“飞沙堰”给规划者一点启示:细化调整,伸缩有度。工程项目离不开规划,一般都是整体思路明了,细节繁琐又不确定,但差错往往出在细节,因此细节的规划研究才是重点与难点。大体框架建好后,要进行细化、量化,还要反复调整修改,这就是“细化调整”。至于细化到何种程度,考虑是否周到,要有分寸,这也是最关键的一个环节,不能一味求“细”,反而重心偏离,效率低下,甚至产生误导,这就要求“伸缩有度”。

都江堰工程与规划管理体系见图 5。

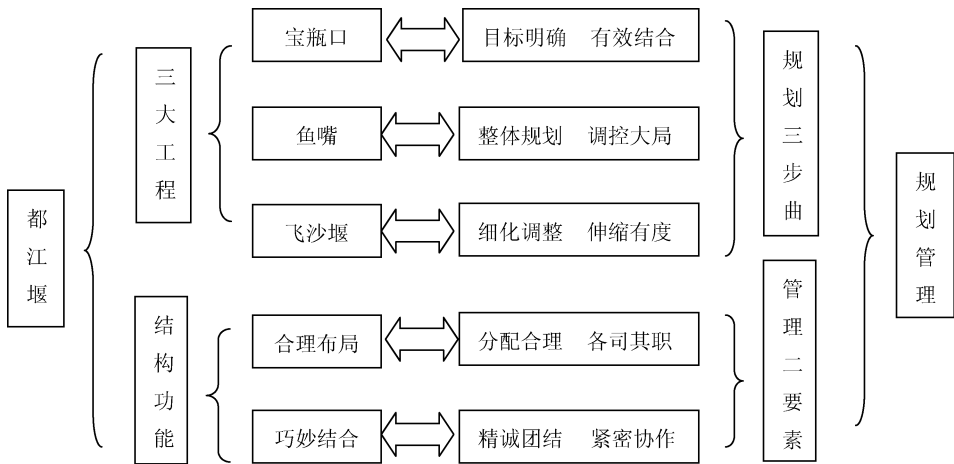


图 5 都江堰工程与规划管理体系

3.2 管理二要素

a. 分配合理,各司其职。都江堰工程设计建设过程中因势利导、因地制宜,三大工程各具特点,对位置、结构、尺寸、方向等的设计布置,与岷江的河势、周边的地理条件、上游来水来沙条件等相互结合;功能上,宝瓶口引水灌溉、鱼嘴分流分沙、飞沙堰阻流排沙,功能相互独立,不可替代;设计上,在构建飞沙堰和鱼嘴时,采用竹笼填石法,就地取材,充分利用岷山附近盛产的大竹制作竹笼、打桩护滩等,以江内淤积卵石为原料填充竹笼筑堰和护坡,不仅清理了河底淤积,而且解决了材料的问题。可见,三大工程因势利导,因地制宜,各具特点,各司其职,不可替代,各自发挥着独特的功能。同样,对管理者来说,要结合个人所长、合理全面分配人力物力财力,要求成员各司其职、独当一面,才能降低成本,提高效率,而不是盲目分配、相互依赖、没有担当。

b. 精诚团结,紧密协作。都江堰工程的经久不衰离不开各个子工程相辅相成,互为补充。同样,对于现代化的企业管理来说,在分配合理、各司其职的团队基础上,最重要的是精诚合作、紧密协作的理念,大家心往一处想,劲往一处使,集思广益,互通有无,团结协作,必然会干出一番事业。

4 都江堰工程的人文思想

4.1 天人合一

“天人合一”是人与自然间关系的一种理想境界。人类活动要顺应自然规律,不能破坏与超越自然规律;自然规律又要为人所用,使之服务于人类的经济繁荣与社会进步。有史以来,人类的进步大多是以向自然界索取作为代价的,很少能够达到“共赢”,生产力低下的古代更是如此。然而,古人因地制宜,因势利导,利用地理环境的特点,发挥人类无穷的智慧,在都江堰工程上实现了“天人合一”。都江堰工程巧妙地利用岷江的自然环境,合理布局各渠首建筑物,使其成为有机统一体:都江堰除了鱼嘴、飞沙堰、宝瓶口三大主要工程之外,还有百丈堤、金刚堤、人字堤等,这些工程的位置、形态及方向等,与岷江河床走势、不同季节上游的来水来沙变化等相互结合,达到巧妙引水、分水、泄洪、排沙等目的。鱼嘴并未横跨江面筑成一道拦河大坝,而是“不与水敌”地顺着河道筑起一道分水堰,并与其上游的百丈堤及下游的金刚堤联合作用,达到分流分沙的目的。与现代化的拦河大坝和闸门调控相比,其优越性依然存在,甚至更有“天成之美”。

都江堰工程作为中国传统水利工程无坝引水的典例,实现了排、灌两便,既不修筑拦断岷江的堰坝,

又不设立取水调水的控制闸门,在无任何人为干预(如开闸、引水、泄洪等)的情况下,能够自动地、自如地调配水量,使灌区内“水旱从人,不知饥馑”,造就了“天府之国”。

4.2 可持续发展

a. 设计理念。作为中国古代水利工程无坝引水的典例,都江堰工程的布置充分利用了河流水文以及地形特点,既满足了引水或通航的需求,又没有改变河流原有的地理特征,因地制宜、无坝蓄水、无闸分流、顺应自然、保护生态环境是其一大特点。然而,20 世纪以来,现代水利科技技术取代了这一水利模式,许多天然河道被闸坝截断,缺乏科学规划,盲目兴建一些水利工程,导致下游断流、地下水枯竭、生态环境遭受严重威胁。

b. 治水技术。为了解决卵石淤积问题,古代人们建立了一套完整的引水排沙技术:利用三大渠首工程巧妙地解决了引水、泄洪及排沙的矛盾;就地取材,合理利用河底淤积卵石筑堰治水,防护岸堤,减少了河床淤积,增加了河道过流能力,保证了内外江河床稳定,从而进一步保证了分沙稳定;管理维修使多余泥沙及时清除,被破坏工程得到及时修复。这也是都江堰工程 2 200 多年经久不衰,成为世界上现存最古老的水利工程之一的主要原因^[7]。

c. 经营管理。在工程运营管理上,都江堰工程坚持严格的岁修制度,形成了独特的治水经验和准则,如“三字经”、“六字诀”、“八字格言”等。在灌区经营管理方面,形成了独特的“官堰民渠”经营管理体系,官民合作,共同受益。现阶段,《都江堰灌区水利管理制度》等系列制度的制定,表明在设备和管理方法上都有了很大的改进,进一步提高了经济效益和社会效益,形成了良性渐进式的持续发展模式。

d. 施工取材。都江堰河底多卵石推移质,河段周边多竹林。李冰等就地取材,采用卵石、竹子和木材,制作的竹笼、杩槎、木桩等构件具有良好的消能防冲性能和生态功能。然而,20 世纪以来,随着钢材和水泥在水工建筑物中普遍运用,对环境和生态造成严重破坏,应该引起反思。

“道法自然、因地制宜”的设计理念,可持续的技术和管理措施以及施工取材,无不反映都江堰工程的可持续发展思想。2 200 余年来,都江堰工程不仅没有对岷江河道、枢纽所在的周边地区以及灌区产生任何生态与环境的负面效应,反而促进了整个成都平原社会效益和环境生态效益的提高与协调发展。面对各种环境生态问题接踵而至的今天,都江堰工程体系非常值得深入研究和借鉴。

参考文献:

[1] 彭述明. 都江堰史[M]. 北京:科学出版社,2004.

[2] 刘玉泉,朱克勤. 浅谈都江堰工程中流体力学原理的运用[J]. 力学与实践,2008,30(4):102-105. (LIU Yuquan,ZHU Keqin. Talking about the application of fluid mechanics principle in Dujiangyan Project [J]. Mechanics in Engineering,2008,30(4):102-105. (in Chinese))

[3] CAO S, LIU X, ER H. Dujiangyan irrigation system; a world cultural heritage corresponding to concepts of modern hydraulic science [J]. Journal of Hydro-Environment Research,2010,4(1):3-13.

[4] CAO Shuyou, FANG Duo, CHEN Jiayang, et al. Model prototype correlation study on bed load transport of Dujiangyan Project, China [C]// Proceedings of the International Symposium. New York: ASCE,1988:247-256.

[5] CAO Shuyou, FANG Duo, CHEN Jiayang. Random characteristics of sediment-laden flows and the techniques of effective sediment exclusion on Dujiangyan Irrigation Project in China [C]// Proceedings of National Conference on Irrigation and Drainage Engineering. New York: ASCE,1988:409-416.

[6] 许志方. 从现代水利科技看中国古代的都江堰[J]. 中国水利,2004(18):25-26. (XU Zhifang. View on the ancient Dujiangyan Project from the modern water science and technology [J]. China Water Resources,2004(18):25-26. (in Chinese))

[7] 林承坤,吴小根. 2200 多年来都江堰的效能为何历久不衰[J]. 自然杂志,2001,23(4):193-198. (LIN Chengkun,WU Xiaogen. Why is Dujiang Weir of the Min River so effective in use over 2200 years? [J]. Nature Magazine,2001,23(4):193-198. (in Chinese))

[8] 张倩倩,黄友权,李育红. 天下名堰与项目管理:都江堰对现代工程项目管理的启示[J]. 施工企业管理,2007(10):76-77. (ZHANG Qianqian, HUANG youquan, LI yuhong. The world famous weir and project management; revelation of Dujiangyan Project on modern engineering project management [J]. Construction Enterprise Management,2007(10):76-77. (in Chinese))

[9] 吴自力. 浅谈都江堰工程对企业人力资源管理的几点启示[J]. 企业家天地,2010(12):54-55. (WU Zili. Revelation on the human resources management of the Dujiangyan Project [J]. Entrepreneurs World,2010(12):54-55. (in Chinese))

[10] 李可可,黎沛虹. 都江堰:我国传统治水文化的璀璨明珠[J]. 中国水利,2008(18):75-78. (LI Keke, LI Peihong. Dujiangyan Project; the shining pearl in China's traditional water culture [J]. China Water Resources,2008(18):75-78. (in Chinese))

[11] 郑钧. 都江堰枢纽区水流泥沙运动规律研究[D]. 北京:清华大学,2008.

[12] 曹叔尤,刘兴年,方铎,等. 山区河流卵石推移质的输移特性[J]. 泥沙研究,2000(4):1-5. (CAO Shuyou, LIU Xingnian, FANG Duo, et al. Transport behavior of pebble bed-load in mountain rivers [J]. Journal of Sediment Research,2000(4):1-5. (in Chinese))

[13] 肖帆,阳本福. 造化与传承:都江堰经久不衰、持续发展的动因[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版),2005,7(4):33-35. (XIAO Fan, YANG Benfu. Fortune and inheritance : the motivation for the enduring and sustainable development of Dujiangyan Project [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences),2005,7(4):33-35. (in Chinese))

[14] 邹礼洪. 都江堰是“以水治水”的成功范例[J]. 西华大学学报(哲学社会科学版),2005,24(6):31-33. (ZHOU Lihong. A successful example of water - control: Dujiangyan Irrigation Project [J]. Journal of Xihua University(Philosophy & Social Sciences),2005,24(6):31-33. (in Chinese))

[15] 陈陆. 李冰无须言 自有都江堰[J]. 中国三峡建设,2008(4):87-92. (CHEN Lu. The Dujiangyan Project by Li Bing [J]. China Three Gorges,2008(4):87-92. (in Chinese))

[16] 徐明,肖帆,阳本福,等. 都江堰水利可持续发展战略研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

(收稿日期:2017 - 03 - 20 编辑:彭桃英)

(上接第 4 页)

[23] MAZZANTI B, CHECCUCCI G, MONACELLI G, et al. Drought and water scarcity indicators: experience and operational applications in italian basins [C]// Proceedings of Austria, EGU General Assembly Conference. Vienna:European Geosciences Union,2013.

[24] KOSSIDA M, MIMIKOU M. An indicators' based approach to drought and water scarcity risk mapping in Pinios River Basin[C]//Proceedings of Greece, European Geosciences Union, General Assembly. Vienna: European Geosciences Union,2013.

[25] Van LANEN H A J, TALLAKSEN L M, STAHL K, et al. Drought, water scarcity and climate change [C]// Proceedings of Austria, EGU General Assembly Conference. Vienna:European Geosciences Union,2012.

[26] LOON A F, LANEN H A J. Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework[J]. Water Resources Research,2013,49(3):1483-1502.

(收稿日期:2017 - 06 - 30 编辑:彭桃英)