

# 筑坝拦截对梯级水库水体氢氧同位素组成的影响: 以嘉陵江为例

张俊<sup>1</sup> 崔高仰<sup>2,3</sup> 李亲凯<sup>1</sup> 黄俊<sup>2,3</sup> 陶月乐<sup>1</sup> 杨梦迪<sup>1</sup> 李斯奇<sup>1</sup> 李晓东<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>天津大学表层地球系统科学研究院, 天津 300072; <sup>2</sup>中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; <sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 筑坝拦截导致河流天然属性的改变, 进而影响了相关流域水循环过程。本研究以嘉陵江流域4座梯级水库为对象, 于2016年1、4、7、10月份采集水样, 分析水体氢氧同位素组成, 以期通过氢氧同位素组成的时空变化特征来探讨大坝拦截对于流域水循环的影响。结果表明, 表层水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 沿河流向上总体有偏正的趋势, 应该是受纬度效应及筑坝拦截作用的共同影响; 研究区水库库区水体在1、10月的 $\delta^{18}\text{O}$ 均值较4、7月偏正, 是降雨量与降雨来源不同导致的结果; 具有热分层特征的水库(亭子口水库)在夏季分层期的 $^{18}\text{O}$ 值变化范围比其他季节大, 其他水库则没有这种特点, 另外, 水库分层还会使得库区表层水与下泄水的氢氧同位素值出现较大差异; 梯级水库的存在使得流域蒸发作用强烈, 导致河水氢氧同位素组成大大偏离当地大气降水线, 研究区夏季(7月)的蒸发作用最强, 春季(4月)次之, 冬秋季(1、10月)最弱。

**关键词** 梯级水库; 氢氧同位素; 时空变化

**Effects of dam interception on hydrogen and oxygen isotope compositions in cascade reservoirs: A case of Jialing River.** ZHANG Jun<sup>1</sup>, CUI Gao-yang<sup>2,3</sup>, LI Qin-kai<sup>1</sup>, HUANG Jun<sup>2,3</sup>, TAO Yue-le<sup>1</sup>, YANG Meng-di<sup>1</sup>, LI Si-qi<sup>1</sup>, LI Xiao-dong<sup>1\*</sup> (<sup>1</sup>*Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China*; <sup>2</sup>*State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China*; <sup>3</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*).

**Abstract:** River damming alters natural attributes of rivers, with consequences on water cycle in the river catchment. In this study, water samples including stratified water from four cascade reservoirs in the Jialing River basin were collected in January, April, July, and October in 2016. The hydrogen and oxygen isotopic compositions and their spatial and temporal variations were analyzed to assess the impacts of dam interception on water cycle in the river basin. The results showed that the  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  values of the surface water were generally turning positive along with the flow path due to the latitude effect and the dam interception. The  $\delta^{18}\text{O}$  values of the water samples were more positive in January and October than those in April and July, which should be resulted from the variations in the amount and sources of precipitation. In the summer stratification period, the range of  $^{18}\text{O}$  value in the reservoir with thermal stratification (Tingzikou reservoir) was larger than that in other seasons. In contrast, it was not the case in other reservoirs. Moreover, reservoir stratification led to divergence in hydrogen and oxygen isotopic compositions between the discharged water and the surface water near dam. The existence of cascade reservoirs enhanced watershed evaporation, which might be responsible for the greater deviation of the hydrogen and oxygen isotope compositions of the river water from the local meteoric water line.

国家重点研发计划项目(2016YFA0601000)和国家自然科学基金项目(41373136)资助。

收稿日期: 2017-11-20 接受日期: 2018-01-29

\* 通讯作者 E-mail: xiaodong.li@tju.edu.cn

The evaporation in the summer ( July) was the strongest in the study area , followed by the spring ( April) and the weakest in the winter and autumn ( January and October) .

**Key words:** cascade reservoirs; hydrogen and oxygen isotopes; spatial and temporal variation.

近几十年来,随着人类社会的高速发展,社会对于水资源和水能的需求日益增加,急剧加速了对河流的开发利用,使得水利工程建设十分迅猛。目前全球主要河流都被大坝拦截,全世界坝高大于15 m的大坝已经超过50000座,而且部分水库仍在建设过程中(贾金生,2010)。水利工程给人类带来巨大的经济效益的同时,也带来一些负面效应(Palanques *et al.*, 2014),其利弊关系一直是科学界争论的热点(Milliman, 1997)。大坝拦截作用是对天然河水环境影响的最剧烈、最广泛的人为扰动事件之一(Petts, 1984)。拦截蓄水后,水库的水深、水动力条件、水体滞留时间、水团混合方式等与天然河流相比发生了显著变化。河流的天然属性遭到破坏,极大地改变了河流物质入海通量及其时空特征(Kelly, 2001),并显著地改变和影响了河流自然环境以及相关的生物地球化学过程(Humborg *et al.*, 2002; Poff *et al.*, 2007)。另外,大坝拦截改变了河流连续性,传统上基于河流连续体概念(Vannote *et al.*, 1980)建立的水环境理论体系受到挑战,研究“蓄水河流”的水环境效应具有重要的科学意义。

长江流域是我国水能资源开发的主要区域,水系发达,干支流水能资源理论蕴藏量共约2.68亿kW,占全国的38.6%(崔磊,2017)。嘉陵江作为长江水系中流域面积最大的支流,水利工程得到大力修建,依据嘉陵江渠化开发规划,在嘉陵江中下游从广元到重庆计划修建15个梯级航电枢纽,嘉陵江中下游河段已成为完全意义上的梯级开发“蓄水河流”(李晓东等,2015)。因此,嘉陵江流域可以为开展大坝拦截背景下水循环过程的相关研究提供良好的实验场所。

氢氧同位素方法是目前定量揭示流域水循环过程的有效手段(Issar *et al.*, 1981)。自然条件下不同水源中的氢氧同位素丰度会存在一定差异,氢氧同位素能够敏感地响应环境变化,反映水体相变过程中同位素分馏(Zhao *et al.*, 2011),因此水体氢氧同位素特征作为一个理想指标被广泛应用于研究水循环过程。单一水电站对其所在流域河段和周围的生态环境的影响是局部的,而梯级水库带来的影响是流域性的(刘兰芬等,2007;王丽萍等,2011)。目前

对于梯级蓄水河流水循环关键过程的认识仍非常有限,难以准确把握拦截背景下及水循环演化规律。本文通过对嘉陵江流域梯级水库水体中的氢氧同位素组成进行研究与分析,结合部分水化学理化参数,在空间和时间上刻画在梯级水库拦截下氢氧同位素的分布及变化情况,以期揭示大坝拦截下河流水循环过程的变化情况,进一步探讨其主要的影响因素以及不同水库类型对于氢氧同位素组成的改造强度,从而为研究大坝拦截对全球变化的影响提供科学依据。

## 1 研究区域及研究方法

### 1.1 研究区域概况

嘉陵江干流地处青藏高原与长江中下游平原之间的过渡带,其大地构造位于扬子准地台、松潘-甘孜巴颜喀拉地槽和西秦岭地槽之间。嘉陵江上游为三大构造交汇处,地质构造复杂,变质岩和岩浆岩广布;中下游为扬子准地台区,地质构造相对简单,出露的主要为沉积岩。本区地层从元古界至新生界均有出露,志留系、泥盆系、三叠系、侏罗系、白垩系和第四系较发育。岩性以砂岩、页岩和碳酸盐岩为主,盆地内主要分布侏罗纪红色砂岩。

嘉陵江发源于秦岭凤县,途经陕西、甘肃、四川、重庆等四个省市,最后注入长江。整体上,嘉陵江流域属亚热带湿润季风气候,中下游年平均降雨量约为1010~1250 mm。嘉陵江流域季平均降水量差异大,春、夏、秋、冬四季降水量分别占全年降水量的22.04%、48.31%、25.79%和3.86%,降水量主要集中于夏季(杜华明等,2015)。

### 1.2 研究方法

在2016年的1、4、7、10月对嘉陵江流域4个水库亭子口(TZK)、新政(XZ)、东西关(DXG)、草街(CJ)进行水样采集,水库特点及基本数据见表1。每个水库均取其入库水、库区水和下泄水,其中库区水根据库区水深选取不同剖面,从预设深度分层采样。选取4个水库的剖面个数分别为2、2、2、3个,1、7、10月依次分别从4个水库采集水样10、9、9、12个,4月份采集10、9、9、10个(草街水库坝前剖面较其他月份减少了2个深度点),采集样品总计158

表 1 梯级水库基础数据

Table 1 Basic data of cascade reservoirs

指标	亭子口水库	新政水库	东西关水库	草街水库
类型	高山峡谷型	峡谷-平原转换型	峡谷-平原转换型	河道型
年龄(截止 2017 年)	3	11	21	6
正常水位/洪水水位/死水位(m)	458/447/438	324/322/-	248.5/241/-	203/200/178
调节方式	年调节	日调节	日调节	日调节/周调节
表面积(km <sup>2</sup> )	80.9	25.6	17.8	72.4
距离河口的面积(km)	574	429	223.6	62.1
水库容积(10 <sup>8</sup> ·m <sup>3</sup> )	40.67	3.402	1.65	22.12
表面平均宽度(m)	61089	69403	78247	156000
平均流量(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	188.8	246.6	277.2	669.5

个采样点位及编号见图 1。现场利用 YSI6620 水质参数仪(美国金泉公司生产)原位测定各个采样点水体中的溶解氧 DO、温度 T、pH 值等参数, 8 h 内进行滴定和过滤处理, 采用 0.45 μm 的醋酸纤维膜进行过滤处理, 过滤后的水样装入 15 mL 离心管内, 经过编号后用 PARAFILM 密封, 并于 5 °C 冷藏保存待测。

氢氧同位素值测定在中国科学院南京地理与湖泊研究所进行, 氢、氧同位素分析采用美国 LGR (Los Gatos Research) 公司研发的液态水同位素分析仪(DLT-100)来测定, 测试精度分别为 1.0‰(氢)和 0.1‰(氧), 利用水氢氧同位素国际标准 V-SMOW2 (Vienna Standard Mean Ocean Water 2, δ<sup>18</sup>O = 0‰, δD = 0‰) 及 SLAP2 (Water Standard Light Antarctic Precipitation 2, δ<sup>18</sup>O = -55.5‰, δD = -427.5‰) 并结合实验室内标, 分析得到了样品氢氧同位素组成。

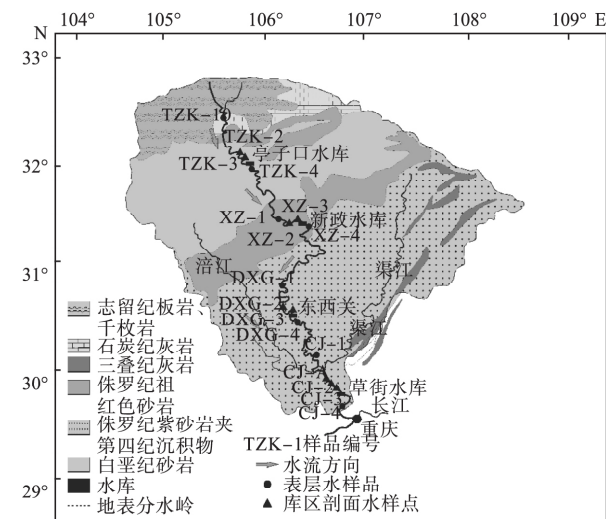


图 1 嘉陵江流域概况及采样点分布示意图

Fig.1 General situation and distribution of sampling sites of Jialing River Basin

所有分析结果用相对于维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)的千分差来表示:

$$\delta = \left( \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{V-SMOW}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

式中:  $R_{\text{sample}}$  和  $R_{\text{V-SMOW}}$  分别代表水样中氧或氢的稳定同位素比率和 V-SMOW 中的稳定同位素比率。

## 2 结果与分析

2016 年 1、4、7、10 月份采集的嘉陵江流域 4 座梯级水库的入库水、库区剖面水、出库水水样分析的氢氧同位素组成结果如表 2 所示。总体来说, 位于上游的水库水体氢氧同位素值均较下游偏负, 年内 δD 平均值为 -61.7‰(亭子口) < -60.7‰(新政) < -56.5‰(东西关) < -55.5‰(草街), δ<sup>18</sup>O 为 -9.5‰(亭子口) < -9.4‰(新政) < -8.9‰(东西关) < -8.7‰(草街); 同一水库在不同季节的库区剖面水体的氧同位素组成呈现出差别, 春夏两季接近, 秋冬两季接近, 总体上春夏季较秋冬季偏负, 这一点在新政水库体现较为明显, 新政水库春、夏季 δ<sup>18</sup>O 分别为 -9.9‰、-9.9‰ (P = 0.494), 秋、冬季分别为 -8.8‰、-8.9‰ (P = 0.118), 说明春夏之间和秋冬之间无显著性差异, 其他季节之间的对比结果则呈显著差异 (P < 0.05)。考虑整个流域 δ<sup>18</sup>O 年内变化也有类似规律, 春、夏季 δ<sup>18</sup>O 均值为 -9.4‰、-9.5‰ (P = 0.614), 秋、冬季为 -8.6‰、-8.8‰ (P = 0.018)。但是氢同位素则没有明显规律, 除春夏季之间外 (P = 0.040) 其他均无显著差异 (P > 0.05)。

## 3 讨论

### 3.1 氢氧同位素时空变化特征

水库水体中的氢氧同位素分布主要受到大气降水输入、支流汇入和湖泊、地下水的控制 (Mueller et al., 2012)。长江流域的氢氧同位素分布主要受到

表 2 样品氢氧同位素组成一般情况(‰)

Table 2 The general situation of hydrogen and oxygen isotopes of water samplings

水库		1月			4月			7月			10月		
		入库	剖面	出库	入库	剖面	出库	入库	剖面	出库	入库	剖面	出库
亭子口	δD	-65.1	-61.8±2.6	-62.5	-60.5	-60.8±5.4	-63.7	-59.1	-62.6±9.5	-62.1	-55.2	-62.5±3.4	-64.4
	δ <sup>18</sup> O	-9.4	-9.4±0.5	-9.3	-9.4	-9.7±1.4	-10.2	-9.5	-10.0±2.4	-10.5	-8.3	-9.2±0.7	-9.4
新政	δD	-60.3	-61.1±1.7	-60.5	-62.1	-60.7±2.3	-61.3	-61.5	-60.5±2.1	-61.1	-59.8	-59.2±2.1	-59.8
	δ <sup>18</sup> O	-9.2	-8.9±0.4	-8.8	-10.1	-9.9±0.8	-9.5	-10.2	-9.9±0.5	-9.9	-8.8	-8.8±0.2	-8.8
东西关	δD	-58.6	-59.1±1.6	-53.3	-55.6	-57.8±7.6	-49.0	-59.9	-57.3±2.2	-58.3	-57.5	-56.4±1.2	-55.1
	δ <sup>18</sup> O	-8.5	-8.8±0.9	-8.3	-9.4	-9.3±0.8	-9.2	-9.6	-9.2±0.5	-9.4	-8.4	-8.2±0.3	-8.0
草街	δD	-56.5	-55.1±3.1	-55.7	-53.7	-50.6±3.9	-52.2	-59.1	-56.3±3.6	-60.2	-55.7	-55.9±1.2	-55.2
	δ <sup>18</sup> O	-8.5	-8.3±0.3	-8.4	-9.4	-8.9±1.1	-8.3	-8.9	-8.9±1.7	-9.6	-8.2	-8.3±0.2	-8.3

大气降水的影响(丁梯平等, 2013)。大气降水中氢氧同位素组成有两个主要影响因素: 一是该降水水汽团的来源性质以及水汽由产生、输送到发生降水事件整个过程中氢氧同位素发生的变化, 这个过程包含纬度效应和大陆效应; 二是地方效应, 包括降水时的各种气象要素(如气温、降水量、湿度等)以及研究区的海拔等(Dansgaard, 1964), 这些效应的影响程度以及彼此之间的关系目前并没有一致的结论(庞洪喜等, 2006; 吴旭东等, 2009; 王贺等, 2016)。另外, 降雨汇入到河流后还会受到蒸发作用的影响, 导致氢氧同位素组成改变。总之, 嘉陵江流域中下游梯级水库段的氢氧同位素组成时空变化与这些因素密切相关。

**3.1.1 空间变化** 在草街库区水 CJ-A 点处的上游有渠江和涪江 2 条支流汇入, 单纯考虑氢氧同位素在河流流向上的变化, 需要考虑支流汇入的贡献。采用流量加权的方法, 并且引用 Li 等 2014 年 7 月份渠江、涪江 2 条支流的氧同位素数据(Li et al., 2014) 及未发表的氢同位素数据, 计算得出 7 月份丰水期渠江和涪江对于干流 CJ-A 处的氢氧同位素的贡献结果如表 3 所示。

综合 4 个月份表层水样的 δ<sup>18</sup>O 和 δD 沿流向的变化情况如图 2 所示。δ<sup>18</sup>O 和 δD 的沿流向的总体

表 3 支流汇入贡献

Table 3 The contribution of tributary remittance

位置	多年平均径流量 (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	δ <sup>18</sup> O (‰)	δD (‰)	δ <sup>18</sup> O 贡献 (%)	δD 贡献 (%)
渠江	639.92	-7.1	-47.1	+0.3	+3.4
涪江	572	-8.5	-59.6	-0.2	-1.9
渠江汇入前	916.28	-8.5	-60.9	-	-
渠-涪汇入点之间	1528	-7.6	-52.8	-	-
涪江汇入后	2100	-8.4	-56.7	-	-

变化趋势基本保持一致, 开始时在亭子口水库段具有偏负趋势, 尤其是在亭子口下泄水处出现较大的降幅, 随后经过新政、东西关水库出现明显偏正趋势, 最后在草街水库保持水平波动。变化曲线整体上呈现偏正趋势, 这一方面可能是大气降水同位素组成受到纬度效应的影响, 随着采样点纬度的降低(图 1), 降水中的 δ<sup>18</sup>O 和 δD 值逐渐偏正, 间接导致河水中的 δ<sup>18</sup>O 和 δD 值增大; 另一方面也体现出了

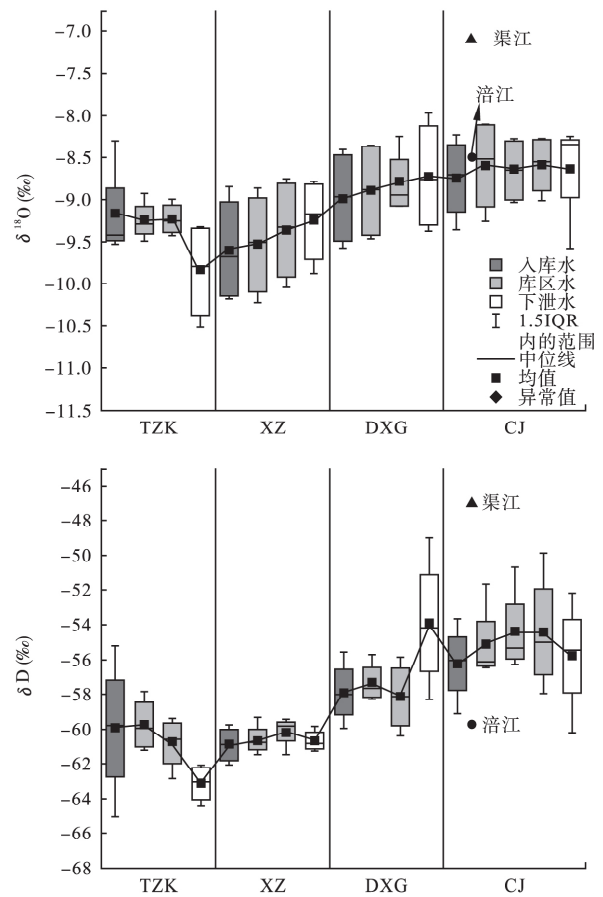


图 2 表层水体 δ<sup>18</sup>O 和 δD 沿流向变化  
Fig.2 Variation of δ<sup>18</sup>O and δD in surface water along the flow path

梯级水库对于河水氢氧同位素组成具有一定的改造作用, 梯级水库的存在使得河流水被层层拦截, 上游表层水体的滞留时间相对于下游较短, 导致蒸发作用时长相对较短, 水体中的氢氧同位素分馏程度也相对较低, 从而使得上游水体相对下游偏负。

**3.1.2 时间变化** 各水库库区水  $\delta^{18}\text{O}$  随月份的变化如图 3 所示。总体上看, 1、10 月份  $\delta^{18}\text{O}$  的均值分别为  $-8.8\text{‰}$ 、 $-8.6\text{‰}$ , 较于 4 月均值  $-9.4\text{‰}$  和 7 月份均值  $-9.5\text{‰}$  偏正。产生这种现象的原因有两方面: 一方面是降水量的差异, 嘉陵江流域夏季降雨量接近年降雨量的 50%, 而冬季降雨则不到 5%, 夏季 (7 月)  $\delta^{18}\text{O}$  偏负应该是由夏季降雨量大, 降雨的  $\delta^{18}\text{O}$  值较河水值偏负, 在中国的西藏高原, 东北部和西部山区的降水  $\delta^{18}\text{O}$  一般低于  $-10\text{‰}$  (Zhang *et al.*, 1998; Luo *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2012), 这些降雨与水库水体混合使得夏季水库  $\delta^{18}\text{O}$  偏负, 最终导致出现夏季比冬季的  $\delta^{18}\text{O}$  偏负的情况; 另一方面是降雨来源不同, 这一点在春秋两季  $\delta^{18}\text{O}$  值差异上可以得到明显的体现, 西南地区具有典型的季风气候, 雨季主要受到西南季风的影响, 降雨来自低纬度海洋, 受沿途降水冲刷作用的影响,  $\delta^{18}\text{O}$  偏负, 而在旱季的降雨主要来源于西风带,  $\delta^{18}\text{O}$  偏正 (章新平等, 2009; Li *et al.*, 2015)。春秋两季在雨量相差不大的情况下, 春季  $\delta^{18}\text{O}$  较秋季偏负, 这可能是由于春季降雨主要来自于西南季风, 而秋季降雨主要来自于西风带的输送, 春夏两季  $\delta^{18}\text{O}$  以及秋冬两季  $\delta^{18}\text{O}$  基本一致也印证了这一观点。另外值得注意的是, 对于年调节的亭子口水库, 水体滞留时间可达一年, 其

运行及泄水方式也会对水库水体的氢氧同位素组成的年内变化造成一定影响, 丰水期水库水位较枯水期高, 从丰水期到枯水期的过程中, 水库逐渐放水, 底部水体下泄到下游, 而丰水期大部分表层水体遗留到了枯水期, 经过枯水期蒸发作用后  $\delta^{18}\text{O}$  值进一步偏正, 也会使得水库  $\delta^{18}\text{O}$  出现冬季较夏季偏正的情况。

### 3.2 主要影响因素

**3.2.1 水库分层** 水库水体存在着分层现象 (刘丛强等, 2009; 喻元秀等, 2009)。一方面, 不同水库出现的分层程度不同, 根据水库的多年平均年径流量与水库库容的比值 ( $\alpha$ - $\beta$  判别法) 可以大致确定水库的温度分层类型, 包括分层型、不稳定分层型、混合型三类 (陈辉, 1999); 另一方面, 同一水库在年内不同时间段的分层情况也呈现差异, 由于气象条件存在季节变化, 导致水库温度分层存在明显的季节特征 (赵雪枫, 2014), 出现冬季混合良好而夏季分层的现象。水温分层同时引起了溶解氧 (DO) 等其他理化指标发生变化, 这些水化学参数的分层变化情况与水库作用过程密切相关, 水库分层特征一定程度上反映了水库水体滞留时间的长短, 会在一定程度上对水库水体氢氧同位素组成分布及变化产生影响。

从 YSI 测得数据得到 4 个水库在 1、4、7、10 月份坝前剖面的温度及 DO 垂直变化情况 (图 4), 新政、东西关、草街 3 个水库的水温在 4 个月份里随深度的变化都很小, 说明这 3 个水库水体垂向混合良好, 年内无分层现象出现; 而亭子口水库在 4、7 月份出现明显的水温分层情况, 起初在 0~5 m 温度变化不明显, 随后温度出现较大梯度降低, 另外, 7 月份的水温随深度减小的趋势显著, 表层与深层水温相差超过  $15\text{℃}$ , 但在 1 月份, 亭子口水库水温随深度变化相对较小, 表层与深层水温相差不到  $1\text{℃}$ , 4、10 月份变化则相对居中。DO 的剖面变化也有类似特点, 总体来说亭子口水库的溶解氧浓度较其他水库随深度变化最大, 而且其最大波动出现在 7 月份, 7 月份 0~5 m 深度 DO 几无变化, 但 5~15 m 出现剧烈减少, 随后少量减少, 在深层水体又有增加, 应该是生物作用和大气气体与水体交换, 水团内部交换的共同作用导致的结果, 在其他季节, 亭子口水库 DO 变化与其他水库相似, 变化不大。通过温度与 DO 的剖面垂直变化, 表明亭子口水库属于不稳定分层水库, 具有夏季分层, 冬季混合, 春秋两季过渡的

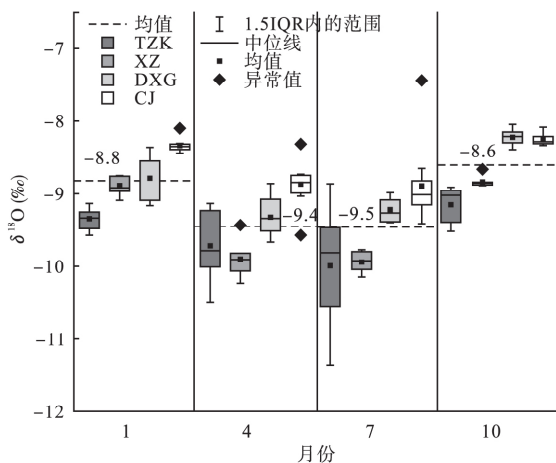


图 3 四个月不同水库库区水  $\delta^{18}\text{O}$  变化

Fig.3 Variation of  $\delta^{18}\text{O}$  of reservoir water in different reservoir in four months



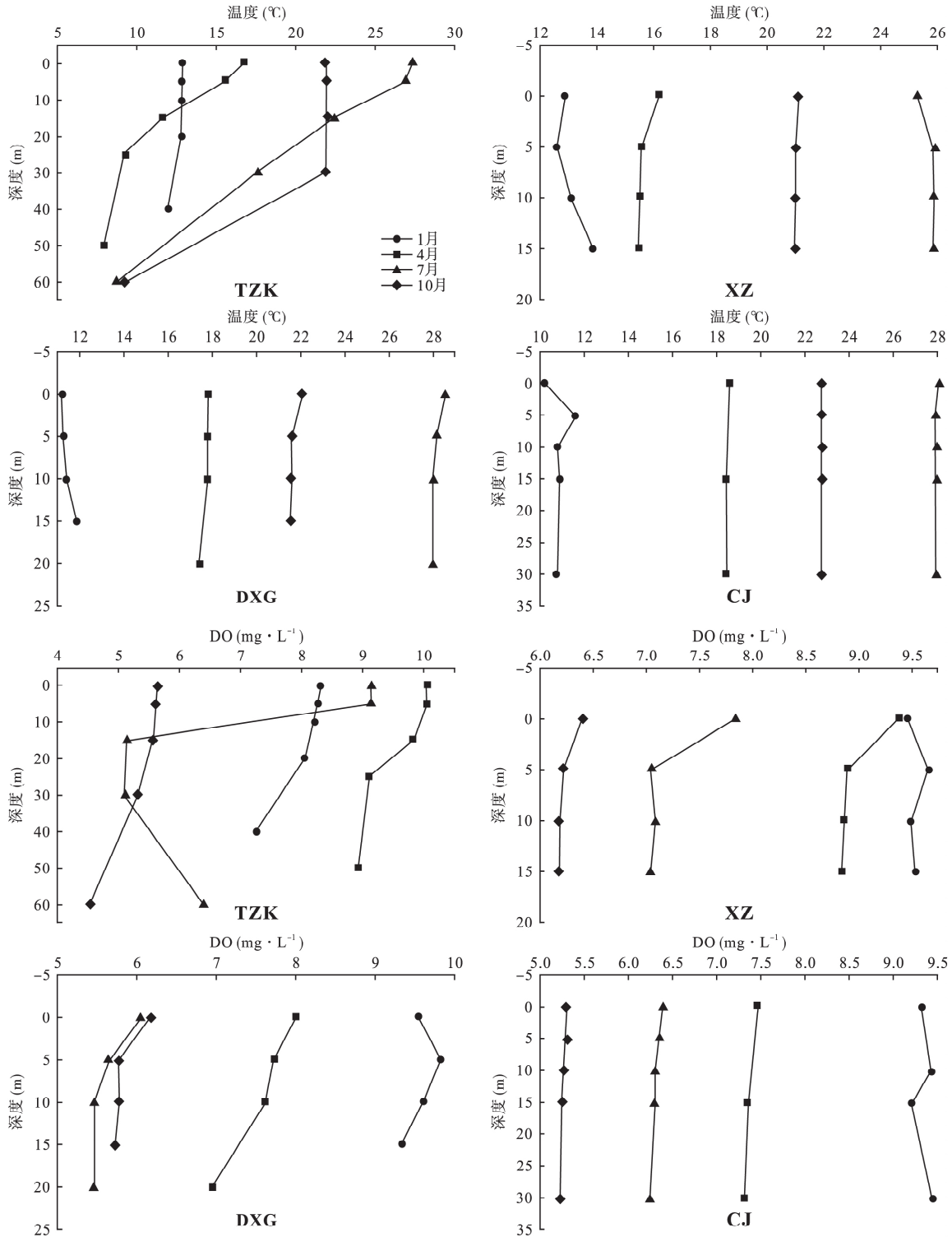


图 4 四个水库坝前剖面温度垂直变化和 DO 垂直变化  
 Fig.4 Changes of temperature and DO of the vertical profiles of four reservoirs

特点,而其他水库属于混合型水库,这应该与它们各自的调节方式及水库水深有关(表 1)。

另外  $\delta^{18}\text{O}$  的相对变化范围或许也在一定程度上反映了水库分层强度。排除温度、湿度等环境因

素的影响,在同一月份里单纯考虑水库类型(是否分层)对于库内水体  $\delta^{18}\text{O}$  变化的影响(图 3)。从图 3 可以得知,亭子口水库  $\delta^{18}\text{O}$  在 4、7、10 月的变化范围均比其他混合型水库大,尤其在 7 月分层期的

$\delta^{18}\text{O}$ 变化范围最大,而在混合期(1月)却没有这种特点,变化范围甚至比东西关水库要小。这一方面体现了不同水库类型由于分层特征及水体滞留时间的不同,上层的水体 $\delta^{18}\text{O}$ 与底层水体出现差异不同,具有分层特征的水库由于分层作用使得水库内 $\delta^{18}\text{O}$ 分布不均匀导致 $\delta^{18}\text{O}$ 的离散程度比混合型水库大。另一方面表明分层型水库由于在不同季节的分层强度不同, $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围的大小也随之改变,在冬季水体混合良好时的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围及离散程度与混合型水库没有明显差别。 $\delta^{18}\text{O}$ 这种与水库分层特征吻合的变化情况,说明 $\delta^{18}\text{O}$ 或许可以用来指示水库分层强度。

为进一步探究水库类型对河流氢氧同位素的作用,计算了4个月份各水库坝前表层水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 值与下泄水的差值,结果如表4所示。如前述,研究对象中亭子口属于不稳定分层型水库,其他属于混合型水库,结果表明具有分层特征的亭子口水库坝前表层水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 值与下泄水的差值均值分别为0.6‰和2.3‰,均大于其他混合型水库,而且混合型水库的差值正负值均有出现,表明混合型水库由于缺乏分层特征,坝前表层水与下泄水氢氧同位素组成并没有呈现明显的规律,而对于具有热分层的水库(亭子口)在分层期(如7月)及过渡分层期(4、10月)由于表层蒸发现象比较强烈,而在底层则缺乏,在水库泄水的情况下,水库下泄水处氢氧同位素组成与坝前表层水相比会有较大差异,但是在混合期(1月)则与其他混合型水库一样无明显规律,比如亭子口水库1月份的 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 出现了负值。

**3.2.2 蒸发作用** 降雨是水库水体的重要来源,由于受到蒸发的作用,河水中的氢氧同位素比率会偏离当地大气降水线(LMWL),偏离程度反映了蒸发作用的强度,蒸发作用越强,偏离程度越大(Clark *et al.*, 1997)。大气降水线表征了 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta\text{D}$ 之间

表4 不同水库坝前表层水与下泄水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 差值  
Table 4 The difference of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  between the surface water of the dam front section and the drainage surface water in different reservoirs

月份	$\Delta\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$				$\Delta\delta\text{D}(\text{‰})$			
	TZK	XZ	DXG	CJ	TZK	XZ	DXG	CJ
1	-0.1	0.1	-0.5	0.1	1.2	-1.0	-6.0	1.6
4	1.1	-0.3	0.1	-0.5	3.7	1.8	-11.4	2.4
7	1.1	-0.2	0.3	0.6	2.7	1.2	1.3	2.2
10	0.4	-0.1	-0.3	0.1	1.6	0.1	-0.7	-0.7
均值	0.6	-0.1	-0.1	0.0	2.3	0.5	-4.2	1.4

的线性关系(肖可等, 2014),大气降水中的氢氧同位素的组成比率随着水的相态转化而发生改变,水汽迁移传输过程中发生的平衡分馏和动力分馏使得降水过程中的氢氧同位素组成存在差异,这种差异可以用大气降水线来刻画。大气降水线的斜率反映了两种同位素之间分馏速率之间的关系,截距指示了D相对于平衡状态的偏离程度(章新平等, 2005)。影响大气降水线的因素主要包括水汽来源、温度、湿度、水汽输送方式等,所以大气降水线广泛应用于研究水循环过程。Craig(1961)首次建立了全球大气降水线(GMWL)  $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ ,并被广泛地用于识别起源于大气降水的地下水与地下水的相互联系。由于区域的气候条件和地理位置的不同,大气降水线随着区域不同也会有一些差别。郑淑蕙等(1983)采集我国8个站台的降水进行 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 分析,首次得出了我国的大气降水线  $\delta\text{D} = 7.9\delta^{18}\text{O} + 8.2$  ( $R^2 = 0.977$ ),与全球大气降水线相差不大。Liu等(2016)基于CHNIP收集了从2005—2010年的928个样本数据,重新提出了我国的大气降水线  $\delta\text{D} = 7.48\delta^{18}\text{O} + 1.01$  ( $R^2 = 0.94$ )。本文研究区域靠近重庆市,故选用温艳茹等(2016)根据2015年4—10月重庆地区61场降雨的同位素资料建立的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 之间的线性关系  $\delta\text{D} = 8.28\delta^{18}\text{O} + 12.34$  ( $R^2 = 0.99$ ,  $P < 0.01$ )作为当地大气降水线(LMWL)。

根据嘉陵江1、4、7、10月份采集的所有水样测得的 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 结果,得到了流域内不同月份的河水线,与当地大气降水线(LMWL)进行比较,结果如图5所示。总体来看,数据点主要集中于LMWL

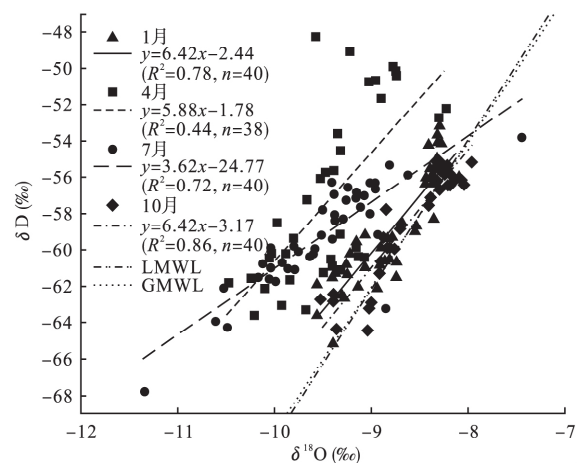


图5 水体氢氧同位素与LMWL的比较  
Fig.5 Comparison of isotopes of water samplings with LMWL

的左上方,只有少部分数据落在 LMWL 下方,数据点整体偏离 LMWL 的程度较大,考虑到大气降水输入主导了长江水的氢氧同位素组成(丁悌平等,2013),出现这样的情况表明嘉陵江中下游梯级水库段蒸发作用强烈。对比一般河流,蓄水性河流的平均流速减缓,水体滞留时间加长使得蒸发作用增强,水体氢氧同位素值较大气降水发生了较大程度的分馏,导致河水的氢氧同位素大大偏离 LMWL。由于气温、风况、光照强度等气候环境条件的不同,蒸发作用在不同季节出现差异。对比各月份氢氧同位素值偏离 LMWL 的程度与及河水线的斜率,发现4、7月份偏离程度较1、10月份大,河水线斜率则是1、10月份最大,4月份居中,7月份最小。蒸发作用会使得 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta\text{D}$ 在河水中的比率增大,导致 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta\text{D}$ 线性关系的斜率相应减小(Li *et al.*, 2015; Wassenaar *et al.*, 2011),因此蒸发作用越强,斜率则越小。不同月份河水线斜率的差异充分说明了研究区夏季(7月)的蒸发作用最强,春季(4月)次之,冬秋季(1、10月)最弱。

#### 4 结 论

空间变化上,表层水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 沿河流流向上的变化趋势基本保持一致,总体上有偏正的趋势,这一方面体现了纬度效应的影响,另一方面也体现了筑坝拦截的作用。梯级水库的层层拦截,使得水体滞留时间加长,蒸发作用时间加长,导致上游氢氧同位素值较下游偏负。

时间变化上,水库库区水体在1、10月的 $\delta^{18}\text{O}$ 均值较4、7月偏正,这一方面是由于降雨量的不同,主要体现在冬夏两季;另一方面是由于降雨来源的不同,主要体现在春秋两季,春季降雨来自于西南季风,秋季来自于西风带。

水库分层影响了水库内部水体氢氧同位素分布,具有热分层特征的水库(亭子口)在夏季分层期的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围相对其他季节大,混合型水库则没有这种特点;另外,水库分层使得库区表层水与下泄水的氢氧同位素值出现较大差异。

嘉陵江中下游梯级水库段蒸发作用强烈,梯级水库的拦截导致河流流速变缓,水体滞留时间延长等水力条件改变,使得蒸发作用较一般河流强烈,河水的氢氧同位素组成大大偏离当地大气降水线(LMWL);通过对比各月份氢氧同位素值偏离 LMWL 的程度与及河水线的斜率,表明研究区夏季(7

月)的蒸发作用最强,春季(4月)次之,冬秋季(1、10月)最弱。

致 谢 感谢天津大学表层地球系统科学院贾国栋博士以及贵州铜仁学院杨周老师在采样过程中的帮助。感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所在样品测试过程中提供实验设备及其他便利。

#### 参考文献

- 陈 辉. 1999. 穆阳溪梯级水库低温水结构分析. 水电站设计, (3): 79-81.
- 崔 磊. 2017. 长江水电开发与生态环境保护. 水力发电, 43(7): 10-12.
- 丁悌平, 高建飞, 石国钰, 等. 2013. 长江水氢、氧同位素组成的时空变化及其环境意义. 地质学报, 87(5): 661-676.
- 杜华明, 延军平, 杨登兴, 等. 2015. 嘉陵江流域降水变化及旱涝多时间尺度分析. 自然资源学报, 30(5): 836-845.
- 贾金生. 2010. 国外水电发展概况及对我国水电发展的启示(一). 中国水能及电气化, (5): 6-10.
- 刘丛强, 汪福顺, 王雨春, 等. 2009. 河流筑坝拦截的水环境影响——来自地球化学的视角. 长江流域资源与环境, 18(4): 384-396.
- 刘兰芬, 陈凯麒, 张士杰, 等. 2007. 河流水电梯级开发水温累积影响研究. 中国水利水电科学研究院学报, 5(3): 173-180.
- 李晓东, 刘小龙, 杨 周, 等. 2015. 嘉陵江梯级水库群溶解无机碳同位素的时空变化特征. 上海大学学报: 自然科学版, 21(3): 286-293.
- 庞洪喜, 何元庆, 卢爱刚, 等. 2006. 天气尺度下丽江季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化. 科学通报, 51(10): 1218-1224.
- 王丽萍, 郑江涛, 周晓蔚, 等. 2011. 水电梯级开发对生态承载力影响的研究. 水力发电学报, 30(1): 12-16.
- 王 贺, 谷洪彪, 姜纪沂, 等. 2016. 新疆伊犁河流域河水同位素与水化学特征及成因. 第四纪研究, 36(6): 1383-1392.
- 温艳茹, 王健力. 2016. 重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系. 环境科学, 37(7): 2462-2469.
- 吴旭东. 2009. 成都地区大气降水稳定同位素组成反应的气候特征. 四川地质学报, 29(1): 52-54.
- 肖 可, 沈立成, 王 鹏. 2014. 藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究. 环境科学, 2014(8): 2952-2958.
- 喻元秀, 汪福顺, 王宝利, 等. 2009. 溶解无机碳及其同位素组成特征对初期水库过程的响应——以新建水库(洪家渡)为例. 矿物学报, 29(2): 268-274.
- 赵雪枫. 2014. 泸沽湖温度分层季节变化及其环境效应(硕士学位论文). 广州: 暨南大学.
- 章新平, 孙维贞, 刘晶淼. 2005. 西南水汽通道上昆明站降水中的稳定同位素. 长江流域资源与环境, 14(5): 665-669.
- 章新平, 刘晶淼, 中尾正义, 等. 2009. 我国西南地区降水中



- 过量氘指示水汽来源. 冰川冻土, **31**(4): 613-619.
- 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 1983. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究. 科学通报, **28**(13): 801-801.
- Clark ID, Fritz P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis. New York: Lewis Publishers.
- Craig H. 1961. Isotopic Variation in Meteoric Waters. *Science*, **133**: 1702-1703.
- Dansgaard W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, **16**: 436-468.
- Humborg C, Blomqvist TS, Avsan E, et al. 2002. Hydrological alterations with river damming in northern Sweden: Implications for weathering and river biogeochemistry. *Global Biogeochemical Cycles*, **16**: 211-213.
- Issar A, Gat J. 1981. Environmental isotopes as tool in hydrogeological research in an arid basin. *Ground Water*, **19**: 490-494.
- Kelly VJ. 2001. Influence of reservoirs on solute transport: A regional-scale approach. *Hydrological Processes*, **15**: 1227-1249.
- Li SL, Yue FJ, Liu CQ, et al. 2015. The O and H isotope characteristics of water from major rivers in China. *Chinese Journal of Geochemistry*, **34**: 28-37.
- Liu J, Song X, Yuan G, et al. 2014. Stable isotopic compositions of precipitation in China. *Tellus Series B: chemical & Physical Meteorology*, **66**: 39-44.
- Li XD, Liu CQ, Liu XL, et al. 2014. Sources and processes affecting nitrate in a dam-controlled subtropical river, Southwest China. *Aquatic Geochemistry*, **20**: 483-500.
- Luo WJ, Wang SJ, Liu XM. 2008. Regional characteristics of modern precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  values and implications for paleoclimate research in China. *Earth & Environment*, **36**: 47-55.
- Milliman JD. 1997. Blessed dams or damned dams? *Nature*, **386**: 325-326.
- Müller B, Berg M, Pernet-Coudrier B, et al. 2012. The geochemistry of the Yangtze River: Seasonality of concentrations and temporal trends of chemical loads. *Global Biogeochemical Cycles*, **26**: 63-74.
- Palanques A, Grimalt J, Belzunces M, et al. 2014. Massive accumulation of highly polluted sedimentary deposits by river damming. *Science of the Total Environment*, **497**: 369-381.
- Petts G. 1984. Impounded Rivers: Perspectives for Ecological Management. New York: Wiley, Chichester.
- Poff NL, Schmidt JC. 2016. How dams can go with the flow. *Science*, **353**: 1099.
- Rozanski K, Araguas-Araguas L, Gonfiantini R. 1993. Isotope patterns in modern global precipitation // Swart PK Lohmann KC, McKenzie J, et al., eds. Climate Change in Continental Isotope Records, Geophysical Monograph Series, volume 78. Washington: American Geophysical Union: 1-36.
- Vannote RL, Minshall GW, Cummins KW, et al. 2011. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, **37**: 130-137.
- Wassenaar LI, Athanasopoulos P, Hendry MJ. 2011. Isotope hydrology of precipitation, surface and ground waters in the Okanagan Valley, British Columbia, Canada. *Journal of Hydrology*, **411**: 37-48.
- Zhang X, Yao T. 1998. Distributional features of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation in China. *Acta Geographica Sinica*, **53**: 356-364.
- Zhao L, Xiao H, Zhou M, et al. 2012. Factors controlling spatial and seasonal distributions of precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  in China. *Hydrological Processes*, **26**: 143-152.
- Zhao LJ, Li Y, Xiao HL, et al. 2011. Isotopic evidence for the moisture origin and composition of surface runoff in the headwaters of the Heihe River basin. *Chinese Science Bulletin*, **56**: 406-415.
- 
- 作者简介 张俊男, 1994年生, 硕士研究生, 主要从事水化学和环境地球化学方面的研究。E-mail: jun\_zhang@tju.edu.cn
- 责任编辑 魏中青
-