长江源多年冻土区季节性河流氢、氧同位素组成*

刘光生1*** 王根绪' 高 洋' 赵 超'

(¹厦门理工学院环境科学与工程学院, 福建厦门 361024; ²中国科学院成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控 重点实验室, 成都 610041)

> **摘 要** 氢、氧稳定同位素方法是研究多年冻土区水文过程的一种有效手段。基于 2009 年风火山流域降水和河水 δD 和 δ¹⁸O 数据,结合水文气象资料,分析多年冻土区季节性河 流氢、氧同位素组成。研究表明,研究期间(6—10月)δ¹⁸O、δD 和氘过剩河水与降水均呈下 降的趋势,表明研究区降水是河水的重要补给来源。2#、3#流域 δD 分别为-66.8% 和 -69.6%,与降水 δD(-66.7%)基本相当;5#流域 δD 为-62.4%,显著高于降水。5#流域较 高的植被覆盖使地表具有更高的有机质含量、水分和蒸散量,其强烈的蒸发分馏作用使河 水富集重同位素。6月份,随着土壤向下融化,降水(δD=-12.1%)驱替冻结封存的重同位 素贫化的土壤水(δD=-71.3%)补给河流;10月份,地表冻结后抑制降水下渗,使降水和河 水 δD 趋于一致,反映了土壤冻融过程在多年冻土区径流过程中起到的重要影响。该研究 为多年冻土区水文过程的变化规律提供了同位素证据。

关键词 长江源;河水;多年冻土;氢、氧同位素;冻融过程

中图分类号 P641.3 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2015)6-1622-08

Composition of hydrogen and oxygen stable isotopes in seasonal river in permafrost watershed of Yangtze River headwater region. LIU Guang-sheng¹, WANG Gen-xu², GAO Yang², ZHAO Chao¹ (¹College of Environmental Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, Fujian, China; ²Key Laboratory of Terrestrial Processes in Mountainous Regions and Ecological Control, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China). Chinese Journal of Ecology, 2015, **34**(6): 1622–1629.

Abstract: Frozen soil plays a key role in hydrological processes and their observations are rare and difficult in permafrost regions. The stable hydrogen and oxygen isotope methods provide a useful tool for permafrost hydrology research. In this study, stable hydrogen and oxygen isotopes composition in seasonal river water was analyzed based on the stable isotope ratios (δD and δ^{18} O) data in precipitation and river water in a permafrost watershed in Yangtze River headwater region in 2009, combined with meteorological and hydrological data. The results showed that the δ^{18} O, δ D and the excess deuterium variation of river water and rainfall all presented descending trends during research period. This implies that the precipitation is the most important source of river water. The δD in river water in the 2nd and 3rd sub-basin were -66.8% and -69.6%, respectively, which were similar to the δD in precipitation (-66.7%). However, the δD in river water in the 5th sub-basin (62.4%) was significantly higher than that in precipitation. Higher vegetation coverage in the 5th sub-basin, higher soil organic matter content, soil moisture and actual evapotranspiration and strong evaporation fractionation effect enriched river water in the 5th sub-basin with heavy isotopes. In June, as the soil melt down, frozen soil water of heavy isotope $(\delta D, -71.3\%)$ was displaced by precipitation $(\delta D, -12.1\%)$ and then fed the river water. In October, the frozen soil inhibited precipitation infiltration and made hydrogen isotope change quickly with precipitation. These indicate that the freeze-thaw cycle plays an important role in runoff processes in the permafrost regions. This study provides isotopic evidence in hydrological

^{*}国家自然科学基金项目(40925002)、厦门理工学院高层次人才引进项目(YKJ12018R)与厦门市科技计划项目(3502720130039)资助。

^{* *} 通讯作者 E-mail: liugs@ xmut.edu.cn

Key words: Yangtze River headwater region; surface runoff; permafrost; hydrogen and oxygen stable isotopes; freeze-thaw cycle.

不同来源的水体具有不同的氢、氧稳定同位素特征,且在水循环中的蒸发和凝结过程都会产生同位素的分馏(孔彦龙等,2010;Gat,2010)。因此,氢、氧同位素常被用于研究冻土区水循环中不同水体的补给来源(Sugimoto et al.,2003;Carey et al.,2013)、地表水和地下水的相互转化关系(Hren et al.,2009;Boucher et al.,2010;Turner et al.,2014)等。此外,冻土在水循环中扮演着十分重要的角色,影响不同季节径流和稳定同位素变化特征(Gibson et al.,2002)。多年冻土区活动层土壤经历年复一年的融化-冻结周期循环,改变了土壤水对径流的补给路径,缩短水分与土壤接触的时间,会影响到径流补给来源(Dahlke et al.,2014),从而改变水体稳定同位素特征。

各国学者对多年冻土区不同水体的氢、氧稳定 同位素特征开展了一些研究,如,有学者在西伯利亚 (Sugimoto et al.,2003)、加拿大北部(Boucher et al., 2010;Turner et al.,2014)多年冻土区小流域开展水 文循环过程研究,分析了不同季节河水稳定同位素 变化特征及径流来源组成。Carey等(2013)利用稳 定同位素和水文观测数据对加拿大育空流域径流同 位素变化特征进行研究,发现深层地下水径流活跃 导致河川径流量增大。国内外学者在认识高原水汽 来源、降水补给高度和河水中同位素高程效应等方 面也取得一些认识(Tian,2007;Hren et al.,2009; Yao et al.,2009a,2009b)。

我国学者对多年冻土区水体氢、氧同位素特征

的研究取得一些成果,但对于长江源多年冻土区流 域季节性河流氢、氧同位素组成变化研究仍较为缺 乏。因此,本研究基于2009年长江源风火山流域降 水和河水氢(δD)和氧(δ¹⁸O)数据,结合降水、径流、 土壤温度和水分等资料,分析流域河水氢、氧稳定同 位素特征,探索冻土区水文过程的影响因子,为长江 源多年冻土区水文循环研究提供同位素证据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区域位于长江源区多年冻土和高寒植被比 较典型的北麓河一级支流风火山流域(图1),隶属 青海省玉树藏族自治州曲麻莱县,地理位置为 92°48′E—93°03′E,34°39′N—34°48′N,流域面积 112.5 km²,海拔4720~5392 m。流域年平均气温为 $-5.2 \ C$,极端最高气温23.2~24.7 $\ C$,极端最低气 温-45.2 $\ C$,年均降水量328.9 mm,年均蒸发量 1316.9~1638.9 mm,平均相对湿度为57%。流域内 没有冰川和积雪覆盖,地表处于裸露状态或者只有 短暂的积雪,河水补给来源中冰雪融水的补给率较 小(王根绪等,2010)。

1#断面为流域控制断面,2#~5#断面为支流观 测断面(图1)。4#和5#子流域植被覆盖率分别达 到42.4%和73.0%,要明显高于2#和3#子流域;5# 子流域高寒沼泽湿地面积达到10.7%,要高于其他 4个流域(表1)。此外,5个流域的平均海拔差异较 小,因此可以忽略同位素海拔效应的影响。



图 1 研究区采样点分布和土地利用类型示意图

Fig.1 Distribution of sampling sites and LUCC map of the study area

Table 1	Vegetation cove	er and eleva	tion differences	between the fiv	ve catchments i	n the study are	ea	
流域	流域面积 (km ²)	海拔 (m)	高覆盖草甸 (%)	中覆盖草甸	低覆盖草甸 (%)	沼泽草甸 (%)	裸土 (%)	总覆盖率 (%)
1#	112.5	4922	28.4	9.7	12.8	4.4	44.8	39.6
2#	17.8	4915	24.8	1.8	18.0	3.3	52.1	32.1
3#	54.5	4948	29.4	4.2	13.9	5.0	47.4	38.2
4#	29.3	4905	24.7	26.1	6.5	2.5	40.2	42.4
5#	1.0	4834	65.8	0.0	10.1	10.7	13.3	73.0

表 1 研究区流域及其子流域植被覆盖和海拔差异

1624

在整个采样期间内(2009年6月21日—10月 12日),气温以9月8日左右为拐点.由原来维持在 5℃上下波动,转变为直线降温的趋势(图2)。采 样期降水量占到全年降水量的83%,包括6月24 日-8月8日第1个降水期(累积降水量220.4 mm) 和 8 月 17 日—9 月 16 日第 2 个降水期(累积降水 量 181.1 mm)。

1.2 样品采集及室内分析

降水、土壤水和河水样品采集,于4#断面附近 的气象站点以次降水为单位收集样品,如果某一日 内有若干次降水.则该日的降水中 δ 值为各次降水 的加权平均值。采用抽取过滤法于流域内采集65 cm 深度的土壤水样,采样时间为6月23日和8月6 日,采样数分别为6个和5个。于5个断面采集河 水样,每个断面每天采集一次,与水文观测同步进 行。样品采集后立刻装入 10 mL 高密度聚乙烯 (HDPE)瓶中,瓶盖为密封的螺纹盖,瓶盖内侧用封 口膜进行密封,并放入冰箱冷藏,以防止蒸发作用引 起的同位素分馏。样品采集时间为 2009 年 6 月 21 日-10月12日,共计收集85个降水样品和494个 河水样。

水样 δ¹⁸O 和 δD 分析:样品送往中国科学院成 都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控 重点实验室,采用液态水同位素分析仪(Los Gatos Research, Inc., USA)进行分析测试。稳定同位素比 率用相对于 Vienna"标准平均海水"(VSMOW)的千 分差来表示,δ¹⁸O 和 δD 的分析误差分别为±0.2% 和±0.6‰(刘文茹等,2013)。

气象水文数据采集:气象数据采用 4#断面附近 的气象观测站数据(图1);在5个断面每日进行流 速和水位观测,观测仪器采用 FP 便携直读式流速 仪(美国):采用1#断面附近径流场20、40、65和120 cm 深度的土壤温度和水分数据。

1.3 数据处理

采用 SPSS 16.0 进行统计分析和主成分分析。 通过多元线性统计把一组观测变量转化为少数的几 个主成分,并计算每个主成分的方差贡献率,确定主 要影响因子。

2 结果与分析

2.1 河水中氢、氧同位素组成及分布规律

2.1.1 河水中δ¹⁸0 和 δD 变化特征 6—10 月河 水中氢、氧同位素随时间变化均呈下降趋势,与降水 变化趋于一致,表现为8月中旬前的高值及其后的 低值(图3)。降水在8月中旬前受到局地小气候的 影响富集重同位素(张应华等,2006),其后受孟加



Fig.2 Distribution patterns of precipitation and air temperature in the sampling periods



图 3 降水及河水中氢、氧同位素随时间变化特征 Fig.3 Variation in δ¹⁸O and δD for precipitation and river water at five stations

拉湾和印度洋海洋性水汽的影响贫化重同位素 (Yao et al.,2009b)。河水的同位素变化明显受到 降水的影响,但其波动幅度远小于降水(表2)。5 个断面河水中δ¹⁸O、δD和氘过剩变幅和标准偏差均 低于降水。降水在渗透到土壤过程中,其同位素变 化不断被削弱,使土壤水和地下水氢、氧同位素趋于 稳定,因而补给的河水同位素变化幅度也相对较小 (Tian et al., 2007)。

1#~3#断面河水 δ¹⁸O 和 δD 均值与降水基本相 当。2#~3#子流域植被覆盖较低(图 1,表 1),且多 年冻土和冻融锋面(弱透水面)的存在,从而具备较 高的产流效率(Boucher *et al.*,2010;Turner *et al.*,

```
表 2 风火山流域降水及 5 个断面河水中 δ<sup>18</sup>O、δD 和氘过剩(‰)的基本统计信息
```

Table 2 Statistics for stable isotope δ^{18} O, δ D and excess deuterium (%) values for precipitation and river water at five river stations within the Fenghuo watershed

项目	降水				1#		2#			
_	$\delta^{18}O$	δD	氘过剩	$\delta^{18}O$	δD	氘过剩	$\delta^{18}O$	δD	氘过剩	
平均值	-9.3	-66.7	8.0	-9.3	-69.5	4.8	-9.1	-66.8	5.6	
最大值	1.6	43.2	30.2	-5.0	-25.7	20.5	-4.3	-24.5	20.7	
最小值	-21.0	-188.7	-30.0	-13.5	-116.2	-25.1	-11.7	-96.7	-18.6	
标准偏差	5.4	52.6	13.0	1.6	14.6	8.7	1.4	12.6	8.6	
N		85			99			99		
		3#			4#			5#		
_	$\delta^{18}O$	δD	氘过剩	$\delta^{18}O$	δD	氘过剩	$\delta^{18}O$	δD	氘过剩	
平均值	-9.2	-69.6	4.3	-8.7	-68.4	1.2	-8.4	-62.4	4.4	
最大值	-5.5	-25.3	20.5	-4.9	-37.7	15.9	-4.8	-32.3	16.0	
最小值	-14.5	-136.0	-23.8	-15.0	-129.2	-24.1	-13.0	-99.3	-15.2	
标准偏差	1.5	14.9	8.4	1.8	16.5	8.5	1.4	12.5	7.4	
Ν		99			99			98		

降水氢氧同位素均值采用降水量加权平均值,而5个断面河水采用算数平均值。

2014),使降水中同位素变化很快在河水中得以体 现。然而.5#断面河水中δ¹⁸O和δD均值明显高于 降水, 目 5#流域面积最小, 这与面积越小降水径流 响应时间越短的认知相背离。5#流域植被覆盖率达 到 73.0%, 尤其是沼泽草甸覆盖率达到 10.7% (图 1, 表1)。范晓梅等(2010)在风火山流域采用小型蒸 渗仪(Lysimeter)对不同植被覆盖下的高寒草甸蒸散 量进行测定,研究发现,植被覆盖 92%、65% 和 30% 高寒草甸的年总蒸散量分别为 314.71、289.48 和 246.22 mm.年蒸散量和夏季(5-10月)蒸散量随植 被盖度增大呈现增加的趋势。此外,研究区的土壤 调查发现,随着土壤有机质含量的增加,0~20和 20~50 cm 深度土壤水分含量均呈现增加的趋势 (图4)。这说明相比植被盖度较低的高寒草甸,沼 泽草甸和高覆盖草甸地表具有更为密集的根系层和 更高的土壤有机质含量(Wang et al., 2009),土壤水 分含量也更为丰富,蒸散量也更高(Sugimoto et al., 2003; Carey et al., 2013), 强烈的蒸发分馏作用使得 5#断面河水中富集重同位素。

2.1.2 河水中氘过剩变化特征 氘过剩(d)大小 与不同水体同位素蒸发富集作用及不同补给水体 d 值大小有直接关系。5个断面河水氘过剩(d)也明 显低于降水,反映了蒸发分馏作用对河水重同位素 富集起到重要作用。此外,降水和河水中氘过剩由 于受局地水汽和海洋水汽交替控制的影响(图5): (1)6月21日—8月14日,河水和降水中氘过剩呈 现略有增加的趋势但并不显著,这与该时期气温维 持恒定有关(图2),进一步印证该段时间降水主要 受局地蒸发水汽的影响。(2)8月15日—9月8 日,该段时间河水和降水氘过剩都呈现下降的趋势, 降水较快补给到河水中,从而使降水的氘过剩变化



图 4 高寒草甸土壤有机质含量与土壤水分的关系

Fig.4 Relationships between soil organic matter content and soil moisture

特征与河水中一致。(3)9月9日—10月21日,该 时期河水和降水中氘过剩均呈现上升的趋势。反映 了海洋水汽的影响不断削弱,局地水汽对降水的影 响影响河水,从而使该时期河水中氘过剩呈递增的 趋势。总体上,降水和河水中氘过剩呈现相似的变 化规律,这也说明研究区降水是河水的重要补给 来源。

2.2 基于主成分法确定主要影响因子

河水中氢、氧同位素组成是降水、土壤水和地下 水同位素组成及蒸发分馏等综合作用的结果,其主 要影响因素包括气象状况、土壤温度、土壤水分和水 文因子等。根据已有的观测资料,选取 2009 年采样 期间的气温、降水、径流深和不同深度(20、40、65 和 120 cm)土壤温度和水分作为计算的因子,进行旋 转主成分分析(表 3)。

如表 3 所示,用 4 个主成分对这些因子进行概 括,第 1 主成分以 40、65 和 120 cm 深度的土壤温度 为主,代表了土壤温度主成分;第 2 主成分以 20、40 和 65 cm 深度的土壤水分为主,代表土壤水分主成 分。第 1 和第 2 主成分贡献率分别达到 49.0% 和 17.5%,表明土壤水分和温度变化对河水稳定同位 素变化起到重要影响。降水人渗进入土壤中,随着 土壤向下融化,驱替原有冻结封存的土壤水和地下 水补给河流。此外,冻融锋面由地表向活动层底部



图 5 降水及 1#断面河水中氘过剩随时间变化特征 Fig.5 Variation in excess deuterium for precipitation and river water

Table 3	Rotated principal component matrix and the contribution percentage											
因子	贡献率 (%)	因子										
		T65	T120	T40	θ120	θ40	θ65	θ20	气温	T20	降水	径流深
1	49.0	0.97	0.95	0.92	0.86							
2	17.5					0.94	0.91	0.77				
3	12.1								0.92	0.73		
4	9.4										0.86	0.82

表 3 主成分旋转负荷矩阵及主成分贡献率

T65 和 065 分别代表 65 cm 深度的土壤温度与水分。

迁移,使土壤的蓄水容量不断增大,其产汇流特征也 发生改变,改变水分在土壤中的滞留时间,进而影响 河水同位素组成。这些过程都显著受到土壤水分和 温度变化过程的影响(Boucher et al., 2010)。

2.3 土壤冻融过程对河水稳定同位素组成的影响

6-8月的降水富集重同位素,而9-10月富集 轻同位素: 河水 δD 呈现递减的趋势. 从 6 月的 -58.4‰减少到9月的82.5‰:受到重同位素富集降 水补给的影响.8月份的土壤水相比6月份富集重 同位素(图6)。根据采样期土壤温度和水分变化特 征(图7),分为3个典型时期进行分析:

(1)6月21日--7月10日,土壤处于融化过程 期。以土壤温度>0 ℃和土壤水分增加的拐点作为 土壤开始融化的判定依据,40、65 和 120 cm 开始融 化的时间分别为 6 月 22 日、7 月 1 日和 7 月 10 日 (图7)。土壤从地表不断向下融化,冻融锋面不断 向下迁移。该时期降水 δD 呈现递减的趋势,而河 水 δD 呈现递增的趋势(图 8a)。降水 δD 在 7 月 1 日前远高于河水,而其后与河水基本相当。研究区 土壤开始冻结的时间在10月中旬(图6),因此冰冻 封存的土壤水 &D 与去年同期的降水 &D 相当,富集 轻同位素(图 8b)。表明随着土壤向下融化,不同深 度土壤冰冻封存的贫化重同位素的土壤水不断被当 次降水驱替,补给到河流中。封存的土壤水被不断



图 6 降水、土壤水和 1#断面河水氢同位素随时间变化特征 Fig.6 Monthly variations in δD for precipitation, soil water and river water at river station 1

被重同位素富集的降水所驱替,而后剖面土壤水中 氢、氧同位素分布形式实际反映了前期降水随时间 变化特征(田立德等,2002)。由于冻融锋面和多年 冻土存在,及流域面积较小等原因,降水同位素变化 很快在河水中得以体现,使得7月1日后河水同位 素组成趋近降水。此外,6月份河水氢同位素位于 降水和 65 cm 深度土壤水中间(图 6),表明该时期 河水的补给来源由直接降水和土壤水组成:且河水 与土壤水的氢同位素数值更为接近,说明河水的补 给来源以土壤水为主。

(2)7月11日—9月22日,0~120 cm 深度土壤 处于完全融化状态(图7)。随着降水 δD 不断降低. 河水 δ D 也呈现递减的趋势(图 3)。8 月份,河水 δD要明显低于降水δD,略低于65 cm深度土壤水



图 7 采样期间不同深度土壤温度与水分变化过程 Soil temperature and moisture regimes during the Fig.7 sampling period



图 8 融化过程(a)和冻结过程(b)降水和河水 δD 随时间 变化特征

Fig.8 Variations in δD for precipitation and river water during the thawing (a) and freezing (b) periods

δD(图 6)。Wang(2009)指出,完全融化期河水的补 给来源以深层壤中流(地下水)为主。由于土壤水 中稳定同位素剖面分布反映了前期降水随时间变化 特征,因此河水 δD 变化直观体现前期降水 δD 的 变化。

(3)9月23日—10月12日,冻结过程期。该时 期日均气温开始低于0℃(图2),且9月23日最低 气温仅为-6.6 ℃, 地表存在"夜冻昼融"现象。10 月 12 日, 20 和 120 cm 深度土壤的温度趋于 0 ℃ (图7),趋近冻结状态,意味着地表和120 cm 深度 以下土壤在10月12日前已处于冻结状态。该时期 河水 δD 趋于稳定,在-70%。左右上下波动(图 8b)。 9月24日和10月1日的两场贫化重同位素的降水 对河水 δD 基本没有影响。而 10 月 12 日的一场降 水 δD 与河水 δD 相当, 且 10 月 7 日一场 14.4 mm 的降水使河水 δD 下降了 23.6‰,降水结束 2~3 天 后恢复到-70%。左右。这些表明冻结开始前河水补 给来源与完全融化期一致,为深层壤中流(地下 水),其 δD 较稳定。而地表冻结抑制降水下渗进入 土壤中,使得降水迅速补给到河流中。地表冻结后, 河水 δD 极易受到降水的影响,表明河水的补给来

源除了深层壤中流,还包括降水。

综述所述,河水氢、氧同位素组成与降水密切相 关。随着土壤向下融化,降水驱替冻结封存的重同 位素贫化的土壤水分补给河流;融化期土壤水稳定 同位素剖面分布反映前期降水变化特征,其补给的 河水氢、氧同位素组成趋近于降水;地表冻结抑制降 水下渗,使降水同位素变化迅速影响河水氢、氧同位 素组成。

3 结 论

降水和河水 δ¹⁸O、δD 和氘过剩呈现相似的变化 规律,表明研究区降水是河水的重要补给来源。 2#~3#流域植被覆盖较低及冻融锋面的存在,使降 水中同位素变化迅速影响河水。5#流域较高的植被 覆盖使地表具有更高的有机质含量、水分和蒸散量, 其强烈的蒸发分馏作用使得 5#断面河水富集重同 位素。随着土壤向下融化,降水驱替冻结封存的重 同位素贫化的土壤水分补给河流;地表冻结抑制降 水下渗,使降水同位素变化迅速影响河水,反映了土 壤冻融过程在多年冻土流域径流过程起到重要作 用。

相比非冻土区,多年冻土季节性河流径流过程 与其氢、氧同位素组成容易受到土壤冻融过程和土 壤水热变化的影响。这是一个极其复杂的过程,仍 需获取不同时期不同深度的土壤水和地下水氢、氧 同位素组成数据,系统分析不同深度土壤水和地下 水补给河水的路径、补给率及滞留时间等,以及地表 覆被差异的影响。

参考文献

- 范晓梅, 刘光生, 王一博, 等. 2010. 长江源高寒草甸植被覆 盖变化对蒸散过程的影响. 水土保持通报, 30(6):17-26.
- 孔彦龙, 庞忠和. 2010. 高寒流域同位素径流分割研究进展. 冰川冻土, **32**(3): 619-625.
- 刘文茹,彭新华,沈业杰,等.2013. 激光同位素分析仪测定 液态水的氢氧同位素及其光谱污染修正. 生态学杂志, 32(5):1181-1186.
- 田立德,姚檀栋, Tsujimura M,等. 2002. 青藏高原中部土壤 水中稳定同位素变化. 土壤学报, **39**(3): 289-295.
- 王根绪,李元寿,王一博,等.2010. 青藏高原河源区地表过 程与环境变化.北京:科学出版社.
- 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等. 2006. 环境同位素在水循环研究中的应用. 水科学进展, 17(5): 738-747.
- Boucher JL, Carey SK. 2010. Exploring runoff processes using chemical, isotopic and hydrometric data in a discontinuous

- permafrost catchment. Hydrology Research, 41: 508-519.
 Carey S, Boucher J, Duarte C. 2013. Inferring groundwater contributions and pathways to streamflow during snowmelt over multiple years in a discontinuous permafrost subarctic environment (Yukon, Canada). Hydrogeology Journal, 21: 67 -77.
- Dahlke HD, Lyon SW, Jansson P, et al. 2012. Isotopic investigation of runoff generation in a glacierized catchment in northern Sweden. Hydrological Processes, 28: 1383-1398.
- Gat J. 2010. Isotope Hydrology: A Study of the Water Cycle. London, UK: World Scientific.
- Gibson JJ, James PA, Kendall HC, et al. 2002. Isotope studies in large river basins: A new global research focus. Eos, Transaction American Geophysical Union, 83: 613-617.
- Hren MT, Bookhagen B, Blisniuk PM, et al. 2009. δ¹⁸ O and δD of streamwaters across the Himalaya and Tibetan Plateau: Implications for moisture sources and paleoelevation reconstructions. Earth and Planetary Science Letters, 288: 20-32.
- Sugimoto M, Naito N, Yanagisawa N, et al. 2003. Characteristics of soil moisture in permafrost observed in East Siberian taiga with stable isotopes of water. Hydrological Processes, 17: 1073–1092.

- Tian LD, Yao TD, Macclune K, et al. 2007. Stable isotopic variations in west China: A consideration of moisture sources. *Journal of Geophysical Research*, **112**: D10112.
- Turner KW, Edwards TW, Wolfe BB. 2014. Characterising runoff generation processes in a lake-rich Thermokarst landscape (old crow flats, Yukon, Canada) using δ¹⁸O, δ²H and d-excess measurements. *Permarost and Periglacial Processes*, 25: 53–59.
- Wang GX, Hu HC, Li TB. 2009. The influence of freeze-thaw cycles of active soil layer on surface runoff in a permafrost watershed. *Journal of Hydrology*, 28: 438-449.
- Yao TD, Zhou H, Yang XX. 2009b. Indian monsoon influences altitude effect of δ¹⁸O in precipitation/river water on the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, **54**: 2724–2731.
- Yao ZJ, Liu J, Huang HQ, et al. 2009a. Characteristics of isotope in precipitation, river water and lake water in the Manasarovar basin of Qinghai-Tibet Plateau. Environmental Geology, 57: 551-556.

作者简介 刘光生,男,1985年生,博士,助理研究员,主要 从事寒区生态水文过程的研究。E-mail: liugs@xmut.edu.cn 责任编辑 魏中青