

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210130

考虑水文变异的大通河生态需水研究

黄成剑,解阳阳,刘赛艳,沈 腾

(扬州大学 水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009)

摘 要:鉴于变化环境对流域水文情势的影响,开展水文变异条件下的生态需水研究尤为紧迫。以大通河流域为研究对象,采用水文变异诊断系统对变异前后的水文序列进行划分,分析变异成因;应用5种概率分布函数拟合变异前月均流量序列,推求概率密度最大处流量,将其作为当月生态需水;最后计算生态需水满足率,分析水文变异对生态需水的影响。研究表明:(1)茆大滩站在1973年、1990年发生弱变异;天堂站、享堂站在1990年发生中变异;(2)变异后,汛期生态需水满足率相比变异前平均下降7%,非汛期生态需水满足率相比变异前平均上升11%;(3)降水减少导致汛期生态需水满足率下降,冻土退化促使非汛期生态需水满足率上升;水利工程建设导致汛期生态需水满足率下降,非汛期生态需水满足率上升。研究结果可为大通河流域水资源开发利用和生态保护提供重要参考。

关键词:生态需水;水文变异;非一致性;综合诊断;大通河流域

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2022)03-0032-05

0 引言

在气候变化和人类活动的双重作用下,许多流域的水文过程发生不同程度的变异,给流域生态系统带来显著影响,流域生态用水问题日趋严峻^[1-2]。因此,亟需开展水文变异条件下的生态需水研究,合理推求河道生态需水,维持生态系统的良性循环。

国内外有关生态需水的研究方法主要有水文学方法、水力学方法等。水文学方法通用性强,在生态需水计算中应用广泛。如逐月频率计算法、改进年内展布法等。这些方法在生态需水研究中尽管颇有成效,但均未考虑水文变异。在变化环境下,更多学者侧重于考虑水文变异的生态需水研究^[3-4]。水文序列变异后,总体分布特征往往发生改变。在变异条件下推求生态需水需要根据变异点划分水文序列,再由概率分布函数拟合变异前序列计算生态需水。肖才容等^[4]使用滑动秩和检验法分析东江流域水文变异,然

而单一检验方法得到的变异点可靠性较低。GREEN等^[5]建议采用多种分布函数对水文序列进行概率分析。刘剑宇等^[3]采用Log-Logistic、Weibull等分布函数拟合变异前日流量序列。李剑峰等^[6]认为,GEV分布更加符合河道内的月均流量。本文在月均流量基础上,采用水文变异诊断系统^[7]对月径流序列综合诊断,采用GEV等多种分布函数描述月径流的概率分布,计算流域河道内各月生态需水量。

大通河是我国西北地区水资源量相对丰富的河流,多年平均径流量达 $28 \times 10^8 \text{ m}^3$,水资源利用率为12.6%。相比周边干旱缺水地区,流域自身用需水量较小,是青海东部和甘肃中西部重要的水源地^[8],为了开发利用流域水资源,先后在该地建设了多个跨流域调水工程。近年来,大通河流域气候变化显著,水资源开发力度较大^[9]。受此影响,流域水文情势可能发生改变,进而影响河道生态需水情况。然而,已有文献主要集中在大通河径流变化规律及成因分析方面^[8-10],鲜有生态需水方面的研究。考虑到大通河在西

收稿日期:2021-03-14

网络首发日期:2022-05-31

网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1814.P.20220530.1430.010.html>

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52009116);江苏省自然科学基金资助项目(BK20200958,BK20200959);中国博士后科学基金项目(2018M642338)

作者简介:黄成剑(1996—),男,安徽黄山人,硕士,研究生,主要研究方向为水文水资源。E-mail:1159611824@qq.com

通信作者:解阳阳(1986—),男,山东巨野人,博士,助理研究员,主要研究方向为水库调度及水资源配置。E-mail: xieyangyang@yzu.edu.cn

北地区的重要作用,本文以大通河流域为研究区域,开展水文变异条件下的生态需水研究,可为流域水资源开发利用和生态保护等提供重要参考。

1 研究区域概况

大通河流域汛期为5月—10月,非汛期为11月—次年4月。尕大滩、天堂和享堂分别为流域上游、中游和河口处的水文站。上游主要为高海拔山区,受人类活动影响较小;中游和下游是流域的主要用水区(见图1)。本文选取尕大滩、天堂、享堂三站作为流域代表站,采用1951—2010年水文站逐月径流分析计算。

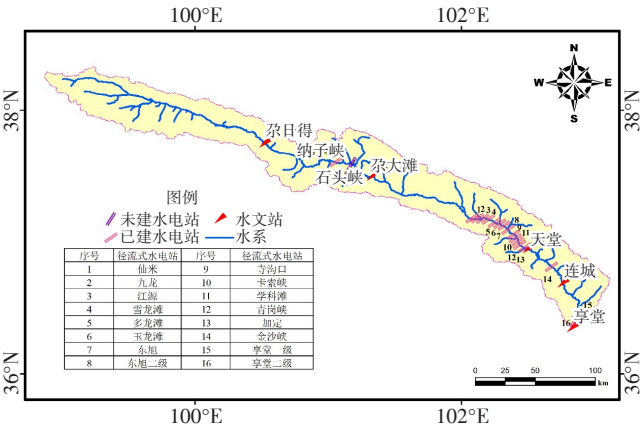


图1 大通河流域水系、水文站分布示意图
Fig.1 Distributions of hydrological stations and river system in Datong River basin

2 研究方法

2.1 水文变异诊断系统

水文变异的检验方法众多^[8-10],为避免单一检验方法的缺陷,采用水文变异诊断系统^[7]检测可能变异点,具体步骤如下:

- (1)采用R/S分析法计算Hurst系数,初步诊断。
- (2)采用Cramer、有序聚类、累计距平、滑动T和滑动F法5种方法详细诊断。
- (3)假设检测出 m 个可能变异点,则可采用式(1)计算变异点的综合权重 p_i 。

$$p_i = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^m c_i} \tag{1}$$

式中: c_i 为第 i 点被检测为可能变异点的次数, p_i 为第 i 点作为可能变异点的综合权重。

- (4)根据 p_i 确定最终变异点,选取 p_i 最大点作为

最终变异点。

2.2 生态需水计算方法

采用完整水文序列难以计算天然状态下的河道生态需水。因此,以变异前的序列表征天然状态下的水文序列,并将流量作为衡量生态环境的重要指标,以概率密度最大处流量作为适宜生态流量。

3 水文变异检验结果及成因分析

3.1 变异点检验

采用2.1节方法计算,得到各代表站的Hurst系数。基于变异程度分级表^[7]可知,尕大滩站为弱变异,天堂、享堂站为中变异。计算可能变异点的 p_i ,确定最终变异点,如表1所示。

表1 变异点最终诊断结果			
Table1 Result of final diagnosis for variation			
站名	最终变异点	综合权重	检验方法
尕大滩	1973	0.33	有序聚类法、累计距平法、滑动T法、滑动F法
	1990	0.33	Cramer法、有序聚类法、累计距平法、滑动F法
天堂	1990	0.23	有序聚类法、累计距平法、滑动F法
享堂	1990	0.40	Cramer法、有序聚类法、累计距平法、滑动F法

综上所述,尕大滩站在1973、1990年发生弱变异;天堂站和享堂站在1990年发生中变异。

3.2 水文变异成因分析

近年来气温和降水对大通河径流产生很大影响^[8-10],人类活动对径流的影响也在不断加剧。随着水资源的开发利用,流域下垫面环境发生改变,造成水文序列发生多时间尺度变异。因此,流域水文序列呈现出非一致性变化。

(1)尕大滩站。大通河径流呈现周期性变化^[8],1966—1975年为丰水期,年径流量偏大,但在1973年前后流域降水大幅减少^[9]。受其影响,河道流量也相应减少,致使该年份径流发生变异。因此,气候变化是引起1973年径流突变的主要原因。1989年流域上游大面积降水,且1990s以后,开始兴修水利工程,在尕大滩至享堂站之间修建了多座水电站对径流年内分配产生较大影响,这与第二个变异点出现时间相近。引起1989年径流变化的主要原因是汛期降水,但这种非持续性成因使得径流突变不具有持续性^[10]。因此,尽管降水对径流变化产生一定影响,但人类活动是导致1990年径流变化的主要原因。

(2)天堂站与享堂站。自1990s起,梯级电站及水利工程的建成使得流域径流发生急剧变化^[9]。这与位于中下游的两站变异时间基本一致。1994年后气温和降水呈显著上升趋势^[11],径流量也理应增加,然而在人类活动的影响下,径流与气温和降水之间呈现负相关性。因此,造成1990年径流变化的主要原因是人类活动。

4 生态需水计算

根据变异点划分水文序列,将尕大滩站划分为1951—1973年、1974—2010年;将天堂、享堂站划分为1951—1990年、1991—2010年。选取 Pearson-Ⅲ、GEV、Weibull、Gumbel、Log-normal 函数拟合变异前的水文序列。采用极大似然法进行参数估计,在95%置信区间内对分布函数采用 Kolmogorov-Smirnov 法进行拟合优度检验,根据 *P* 值选取最优分布函数描述径流变化规律。

以天堂站为例,依次进行 K-S 检验,求得各月 *P* 值(见表2),并以8月份径流序列为例比较理论与经验概率分布(见图2);其他两站计算方法同理,最终得到各站逐月最优分布函数与生态需水(见表3)。

表2 天堂站拟合优度检验值 *P*
Table2 K-S test value *P* of Tiantang station

月份	P-Ⅲ	GEV	Weibull	Gumbel	Lognormal
1	N/A	0.1411	0.1341	0.1552	<u>0.0995</u>
2	N/A	<u>0.0983</u>	0.1170	0.1399	0.1157
3	<u>0.0937</u>	0.0973	0.1499	0.1774	0.1309
4	<u>0.0659</u>	0.0727	0.1200	0.1718	0.0699
5	0.1076	<u>0.0938</u>	0.1578	0.1993	0.1102
6	0.0797	0.0817	0.1147	0.1645	<u>0.0780</u>
7	0.0816	0.0915	0.1323	0.1924	<u>0.0780</u>
8	<u>0.0656</u>	0.0731	0.1056	0.1499	0.0750
9	0.0709	0.0837	0.1203	0.1941	<u>0.0687</u>
10	0.0945	<u>0.0846</u>	0.1453	0.1500	0.0912
11	<u>0.0939</u>	0.1031	0.1556	0.1656	0.1189
12	0.1304	<u>0.1254</u>	0.1698	0.1811	0.1269

注:标注下划线的值表示为当月最优概率分布函数,N/A 代表当月序列不服从该分布。

由表2可知,单一分布函数难以描述各月的径流统计特征。各月最优分布函数存在差异,其中以 P-Ⅲ、GEV、Lognormal 等三种分布的拟合效果最优。因此,建议采用多种分布函数对各站,各月流量分别进行概

率分析。由图3可知,天堂站各月生态需水基本小于变异前后的月均流量。变异后汛期(5月—10月)各月流量相比变异前平均下降7.7%,但非汛期(11月—次年4月)各月流量相比变异前平均上升3.4%。

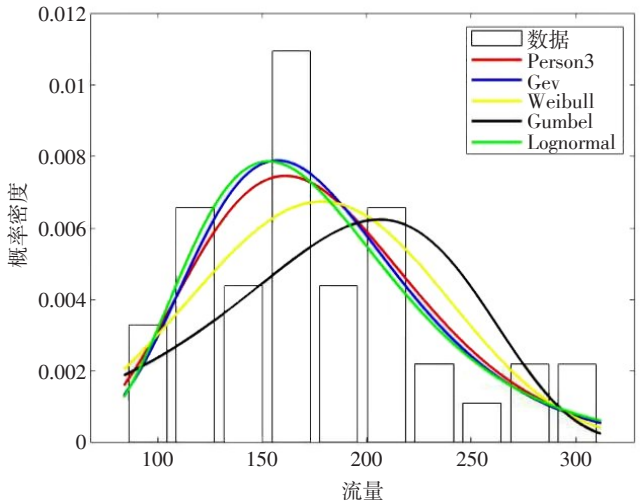


图2 天堂站8月概率分布曲线

Fig.2 Probability distribution curves of Tiantang station in August

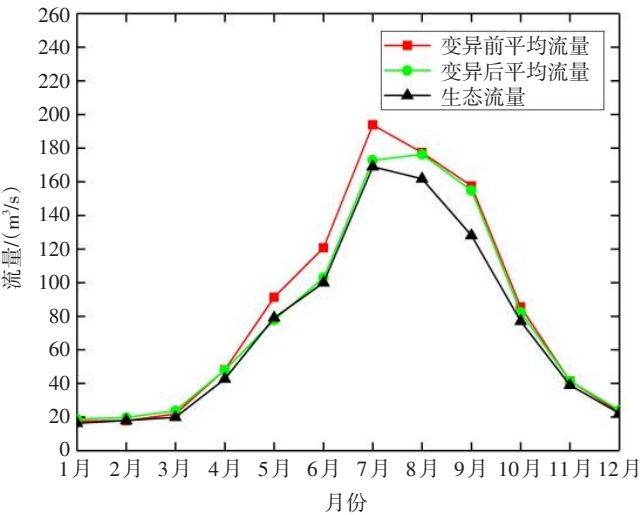


图3 天堂站各月生态需水

Fig.3 The ecological water requirements of Tiantang station in each month

4.1 对比其他生态需水计算方法

将结果与常用水文学方法(逐月最小流量法、年内展布法、逐月频率计算法)对比,其中逐月频率计算法的保证率每月均定为50%,采用 Tennant 法评价生态需水等级。因篇幅所限,只将各方法所得年均生态需水及评价等级汇总,如表4所示。

由表4可知,本文结果与逐月频率计算法结果相近,其 Tennant 等级均为最佳;而其余两方法结果较

表3 各站点逐月最优分布函数及生态需水
Table3 The monthly optimal probability distribution functions and ecological water requirements at each station

月份	尕大滩		天堂		享堂	
	分布函数	流量 /m ³ ·s ⁻¹	分布函数	流量 /m ³ ·s ⁻¹	分布函数	流量 /m ³ ·s ⁻¹
1	Weibull	6	Lognormal	16	Lognormal	21
2	Lognormal	3	GEV	18	P-Ⅲ	20
3	GEV	7	P-Ⅲ	20	GEV	26
4	P-Ⅲ	25	P-Ⅲ	43	Lognormal	52
5	GEV	49	GEV	79	GEV	86
6	GEV	70	Lognormal	100	GEV	116
7	Gumbel	115	Lognormal	169	GEV	187
8	GEV	99	P-Ⅲ	150	GEV	180
9	P-Ⅲ	72	Lognormal	128	P-Ⅲ	156
10	Weibull	41	GEV	77	P-Ⅲ	84
11	GEV	17	P-Ⅲ	39	GEV	44
12	GEV	7	GEV	22	P-Ⅲ	24

表4 生态需水评价结果
Table4 The evaluation results of ecological water requirements

站点	本文生态 需水/m ³ ·s ⁻¹	Tennant 等级	逐月最小流 量法/m ³ ·s ⁻¹	年内展布 法/m ³ ·s ⁻¹	逐月频率计 算法/m ³ ·s ⁻¹
尕大滩	43.2	最佳	27.6	28	45.4
天堂	72.8	最佳	44.1	46	74.3
享堂	82.9	最佳	54.3	54.3	84.6

小,其Tennant等级均为中等。不同方法结果差异的主要原因在于:逐月最小流量法是根据各月资料最小值计算生态需水;年内展布法是根据多年月均径流与同期均值比的乘积计算生态需水;而本文则是基于统计学方法客观描述各月径流变化规律,方法原理不同。因此,考虑水文变异的生态需水计算方法结果更优。尽管逐月频率算法与本文结果相近,但保证率的选取标准尚未统一,结果主观性较强。综上所述,考虑水文变异的生态需水计算方法结果更具合理性。

5 讨论

计算各月生态需水满足率^[12]见表5,分析讨论各类因素对生态需水的影响。

由表5可知,变异前各站全年生态需水满足率基本高于50%。变异后,各站汛期生态需水满足率平均下降8%、5.8%和7%;非汛期生态需水满足率平均上升7%、17%、10%。变异后汛期平均流量下降,非汛期

表5 各站点变异前后生态需水满足率(%)
Table5 The satisfaction rates of ecological water requirements before and after hydrological variation in each station

站点	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
尕大滩	变异前	39	87	70	57	57	65	74	65	65	52	65
	变异后	51	86	81	60	43	51	49	62	68	57	65
天堂	变异前	55	45	58	68	65	63	55	63	63	63	48
	变异后	85	65	80	65	45	55	60	50	70	60	75
享堂	变异前	58	53	65	58	70	65	68	60	65	65	73
	变异后	70	70	85	50	55	55	65	55	70	50	80

平均流量上升,与图3结论一致。此外,变异后非汛期4月份生态需水满足率下降,汛期9月份生态需水满足率上升,这与季节性冻土的年内变化特征有关^[13]。该地区的冻土在每年4月冻结,此时地下水补给较少,径流量下降,但由表3可知,4月份生态需水量要求较高,致使当月生态需水满足率下降。同理,在每年9月,冻土已完全融化,受地下水补给的影响,径流量有所上升,故该月生态需水要求基本得到满足,生态需水满足率上升。尽管在4月和9月的生态需水满足率与上文规律存在差异,但总体来看,变异后生态需水满足率仍遵循汛期下降、非汛期上升的规律。

生态需水满足率在汛期和非汛期变化趋势相反。从自然因素分析,流域降水主要集中在5月—10月,1973年降水大幅下降,导致汛期径流量减少,满足生态需水的频率降低,汛期生态需水满足率下降。此外,白雁翎等^[14]研究指出,冰川融水和冻土退化同样影响径流的年内分配。11月—次年4月属于秋冬季节,冰川融水对径流的作用很小,故非汛期径流增加的主要原因为冻土退化。大通河上游地区分布有大面积的季节性冻土,近年受气温升高影响,冻土活动层增厚,土壤蓄水容量增加^[13],汛期结束后有更多地下水可用于补充河道,流域产汇流机制改变。因此,间接补充了非汛期河道流量,非汛期各月生态需水满足率上升。

从人为因素分析,水利工程的建设改变了径流的年内分配情况。1990年以后,各站汛期径流量占比减少,非汛期径流量占比上升^[9]。在水利工程的调蓄作用下,水库在汛期拦蓄上游来水,使得下游河道流量减少,从而降低汛期生态需水满足率;水库在非汛期向下游泄水,补充下游河道流量,从而提高非汛期生态需水满足率。水利工程的建设有效利用了富余水

量,发挥了水库蓄丰补枯的作用,使径流年内分配趋于均匀,减少了水文季节变化对于用水的影响。

通过分析以上可知,径流的年内分配规律已发生改变,在计算生态需水时需要考虑水文变异。考虑水文变异的生态需水计算方法 Tennant 评价等级为最佳,其结果能够满足生态需水要求,客观反映径流变化规律,更具合理性。需要注意的是,生态需水满足率并非越高越好,在变化环境下流域水文情势已发生明显改变,要求各月均满足生态需水显然是不合理的。因此,建议采取适当措施合理调控水资源,尽量保证变异前后生态需水满足率相当。

6 结论

本文以大通河流域为研究对象,基于水文变异诊断系统划分水文序列,应用多种概率分布函数拟合变异前月均流量序列,推求河道生态需水,并分析变异前后的生态需水满足率,得出以下结论:

(1)水文变异综合诊断结果表明,尕大滩站在1973年、1990年发生弱变异;天堂站、享堂站在1990年发生中变异。分析水文变异成因发现,1973年突变的主要原因是所在年份降水大幅减少;1990年突变的主要原因是水利工程建设影响。

(2)分析变异前后的生态需水满足率可知,在气候变化的影响下,降水减少导致大通河汛期生态需水满足率下降,冻土退化促使非汛期生态需水满足率上升;在人类活动的影响下,水利工程建设导致汛期生态需水满足率下降,非汛期生态需水满足率上升。

(3)相比其他水文学方法,考虑水文变异的生态需水计算方法能够满足河道生态需水要求,客观反映径流的演变规律,结果更具合理性。

参考文献:

- [1] ZHANG Q, XU C Y, ZHANG Z, et al. Changes of atmospheric water vapor budget in the Pearl River basin and possible implications for hydrological cycle [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2010,102(1-2):185-195.
- [2] MENG X J, CHANG J, WANG X, et al. Multi-objective hydropower station operation using an improved Cuckoo search algorithm [J]. *Energy*, 2018,168:425-439.
- [3] 刘剑宇, 张强, 顾西辉. 水文变异条件下鄱阳湖流域的生态流量[J]. *生态学报*, 2015,35(16):5477-5485. (LIU Jianyu, ZHANG Qiang, GU Xihui. Evaluation of ecological flow with considerations of hydrological alterations in the Poyang Lake basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(16):5477-5485. (in Chinese))
- [4] 肖才荣, 胡微雨, 陈成豪, 等. 考虑水文变异的东江流域河道内生态流量研究[J]. *水利水电技术*, 2016,47(10):62-66,133. (XIAO Cairong, HU Zhiyu, CHEN Chenghao, et al. Study on eco-flow in river channel of Dongjiang River Basin under consideration of hydrological variation [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2016, 47(10):62-66,133. (in Chinese))
- [5] GREEN J R, HEGAZY Y A S. Powerful modified-EDF goodness-of-fit tests [J]. *Publications of the American Statistical Association*, 1976,71(353):204-209.
- [6] LI J F, ZHANG Q, CHEN X H, et al. Study of ecological instream flow in Yellow River considering the hydrological change [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011,66(1):99-110.
- [7] 谢平, 陈广才, 雷红富, 等. 水文变异诊断系统[J]. *水力发电学报*, 2010,29(1):85-91. (XIE Ping, CHEN Guangcai, LEI Hongfu, et al. Hydrological alteration diagnosis system [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010,29(1):85-91. (in Chinese))
- [8] 董军, 胡进宝, 魏国孝. 大通河流域径流变化及特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2018,29(6):75-80,87. (DONG Jun, HU Jinbao, WEI Guoxiao. Analysis of runoff variation and characteristics in Datong River Basin [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018,29(6):75-80,87. (in Chinese))
- [9] 王大超. 大通河径流变化特征及其影响因素探析[D]. 兰州:兰州大学, 2019. (WANG Dachao. Runoff Variation Characteristics for Datong River and Its Influencing Factors [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019. (in Chinese))
- [10] 刘赛艳, 黄强, 解阳阳, 等. 大通河流域上游径流变化特征与突变分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016,44(3):219-226. (LIU Saiyan, HUANG Qiang, XIE Yangyang, et al. Abrupt change and variation characteristics of runoff in the upper reaches of Datong River basin [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2016,44(3):219-226. (in Chinese))
- [11] 白雁翎, 王芳, 刘扬. 大通河上游径流演变及驱动因素定量分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021,19(1):103-110,167. (BAI Yanling, WANG Fang, LIU Yang. Quantitative analysis of runoff evolution and driving factors in the upper reaches of Datong River [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021,19(1):103-110,167. (in Chinese))
- [12] 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 等. 水文变异下的黄河流域生态流量[J]. *生态学报*, 2011(17):4826-4834. (ZHANG Qiang, LI Jianfeng, CHEN Xiaohong, et al. Evaluation of the ecological instream flow in the Yellow River basin with hydrological alterations [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011(17):4826-4834. (in Chinese))
- [13] 唐保春, 马月花, 权国苍, 等. 冻土冻融对地下水的影响:以祁连山多年冻土区大通河谷融区为例[J]. *地质科技情报*, 2016,35(4):164-171. (TANG Baochun, MA Yuehua, QUAN Guocang, et al. Impact of freezing-thawing process of frozen soil on groundwater: a case study in the Datong River valley area of the Qilian permafrost region [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016,35(4):164-171. (in Chinese))

(下转第19页)