

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.05.01

浅循环泉简析

周训^{1,2}, 李晓露¹, 王蒙蒙¹, 王洁青¹, 郭娟¹, 刘海生¹, 杨苗林^{1,3}, 王晓翠^{1,4}, 任振华¹, 郑玉慧^{1,5}
(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)地下水循环与环境演化教育部重点实验室, 北京 100083; 3. 四川省地质矿产勘查开发局九〇九水文地质工程地质队, 四川 绵阳 621000; 4. 青岛大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266071; 5. 河南省地质矿产勘查开发局第二地质环境调查院, 河南 郑州 450053)

摘要: 泉按照出露原因通常可以分为侵蚀泉、接触泉、溢流泉(溢出泉)和断层泉等。根据泉眼和地下水循环深度(或径流位置)的相对关系, 泉可以分为表层泉、浅循环泉和深循环泉。地下水在地下流动(循环)的最深处仍然高于泉口, 这类泉称为浅循环泉。浅循环泉出露的位置并不在地形最低处, 其补给来源主要是大气降水入渗, 地下水受到重力作用自高处往低处流动, 在地下径流的途径短、时间短, 流量一般不大。浅循环泉通常是常温泉、淡水泉(也有咸泉和盐泉), 多是常年性泉, 也有部分是季节性泉或暂时性泉。广西北寮岭北坡泉和云南顺荡井盐泉是典型的浅循环泉。

关键词: 泉; 盐泉; 温泉; 常温泉; 地下水; 成因

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)05-0001-05

A preliminary analysis of the springs of shallow groundwater circulation

ZHOU Xun^{1,2}, LI Xiaolu¹, WANG Mengmeng¹, WANG Jieqing¹, GUO Juan¹, LIU Haisheng¹,
YANG Miaolin^{1,3}, WANG Xiaocui^{1,4}, REN Zhenhua¹

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. MOE Key Laboratory of Groundwater Circulation and Environmental Evolution, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Hydrogeology and Engineering Geology Team 909 of Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Mianyang, Sichuan 621000, China; 4. School of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China; 5. No. 2 Institute of Geo-environment Survey of Henan Bureau of Geology Prospecting and Developing, Zhengzhou, Henan 450053, China)

Abstract: Springs are classified based on their genesis into depression spring, contact spring, overflow spring and fault spring, etc. Based on the depth of groundwater circulation (or the position of groundwater flow), springs can be classified into the spring of surficial groundwater circulation, the spring of shallow groundwater circulation and the spring of deep groundwater circulation. A spring is referred to as the spring of shallow groundwater circulation when its orifice is still lower than the deepest position of groundwater flow in the subsurface. The spring of shallow groundwater circulation does not occur in the lowest topography. After receiving recharge from infiltration of precipitation, groundwater flows from high position to low position as a result of gravity. Groundwater flow path for this kind of springs is short and the groundwater residence time is

收稿日期: 2017-01-08; 修订日期: 2017-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572223); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2652016098, 2652015426); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB403005)

第一作者: 周训(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事水文地质、地下水科学与工程专业的教学与研究。E-mail: zhouxun@cugb.edu.cn

not long. Springs of shallow groundwater circulation are generally ambient springs and fresh water springs (also saline springs or salty springs), and most of them are perennial springs and parts of them are seasonal springs or temporary springs. The Beiliaoling Northern Slope spring in Guangxi and the Shundangjing salty spring in Yunnan are typical springs of shallow groundwater circulation.

Keywords: spring; salty spring; hot spring; ambient spring; groundwater; genesis

泉是地下水的一种重要排泄方式。泉在区域地下水循环中起到重要的作用^[1-2]。天然出露的泉水本身就是宝贵的水资源。一些水质好、流量较大且稳定的泉,可以直接用于各种目的的供水。特殊的泉,例如温泉可以用于洗浴、取暖、温室种植和养殖及理疗保健等,盐泉可以用来制取食盐等物质,含有有益于人体健康的微量元素或气体成分的泉水可以作为矿泉水开发利用。泉水及其与其他景观例如钙华等相配合,可以作为旅游资源^[3-4]。人们很久以来就一直关注、利用和研究泉水。

野外分布有各式各样的泉。大多数泉的形成主要是由于含水层或含水带内地下水面与地形面相交,地下水在地形面较低处流出地面;或者是在地下水测压水面高于地形面的区域有导水通道沟通含水层与地表,地下水经由导水通道而涌出地表^[3-4]。泉的分类很早就引起研究者的兴趣。泉的成因分类是研究者最为关注的分类。前人根据出露原因可以将泉分为侵蚀泉、接触泉、溢流泉(溢出泉)、断层泉和接触带泉^[5-7]。周训等较为系统地对比泉的分类进行了总结,包括侵蚀泉、接触泉、溢流泉、涌流泉(涌出泉)和断层泉等的成因分类,根据泉水的物理和化学指标分类,例如冷泉、常温泉、温泉、沸泉和咸泉、盐泉等,还有比较特殊的泉——水下泉、感潮泉、虹吸泉、月牙泉等^[3-4]。在国外,早在1919年Bryan就根据成因将泉分为侵蚀泉、接触泉、自流泉等^[8]。Bear将泉分为洼地泉、滞水泉、裂隙泉、承压泉^[9]。Alfaro等将泉分为岩溶泉、冰川泉、温泉、矿泉^[10]。Fetter将泉分为下降泉、接触泉、断层泉、落水洞泉、节理泉、裂隙泉^[11]。Pentecost将泉分为重力泉、侵蚀泉、断层泉、溢流泉(溢出泉)、上升泉^[12]。Springer等将泉分为溶洞泉、裸露泉、喷泉、间歇喷泉、悬挂泉等^[13]。Glazier对泉的分类进行了总结,提出了灰岩泉、砂岩泉、渗出泉、高位溢流泉和低位溢流泉等类型^[14]。Kresic等将泉分为裂隙泉、溶洞泉、重力泉、自流泉、接触泉、侵蚀泉等^[15]。在野外也存在不同类型的组合成因的泉水,例如两种成因组合的泉——接触溢流泉、侵蚀溢流泉、侵蚀断层泉等,甚至三种成因组合的泉——侵蚀接触溢流泉等^[3-4]。同一个泉也可以根据不同分类给出其名字,例

如出露于断层带的水温52℃、总溶解性固体(TDS)小于1g/L的泉水,可以称为断层泉、温泉和淡水泉等。

本文介绍一种泉的分类——根据排泄泉水的含水层中地下水循环(径流)的位置与泉眼关系的分类,着重讨论浅循环泉的特点,并用实例加以说明。

1 浅循环泉的特征

在各种各样的泉水中,涌流泉和浅循环泉是不久前才被定义和描述的泉。

在野外可以见到一种成因的泉——涌流泉(涌出泉)。当含水层被透水性差的松散沉积物覆盖或埋藏在相对隔水的岩层之下,含水层地下水头高于地面,地下水可以穿过松散沉积物或坚硬岩层局部透水性较好的地段涌出地表,这便是涌流泉或涌出泉^[3-4]。其特点是所排泄的含水层地下水具有承压性,而且地下水头在泉眼附近高于地表;泉水通过上覆隔水层(或弱透水层)局部透水性较好的地段涌出地面^[16],附近没有导水断层。涌流泉没有侵蚀泉、溢流泉、断层泉等那样多见。

根据地下水循环深度或径流位置和泉口的关系可以将泉分为表层泉、浅循环泉和深循环泉^[3-4]。在潮湿多雨的岩溶山区的表层岩溶带和基岩山区的表层风化裂隙带,分布有表层泉(图1a),地下水仅在表层岩溶带和风化裂隙带分布和流动。排泄表层岩溶带地下水的表层泉又称为表层岩溶泉。表层岩溶是指在可溶岩地区地表形成的岩溶,主要分布于热带亚热带湿润气候下的峰丛山区的峰顶、垭口和峰麓地带^[17]。在基岩地区裂隙在一定深度下几乎不发育,当地形切割低于裂隙发育带,大气降水入渗到一定深度后汇集在地形低处流出地面成泉,其特点是地下水循环(径流)的最低处仍然高于泉口,这类泉称为浅循环泉(图1b)。如果地下水在含水层中循环(径流)的最深处低于泉口,这类泉称为深循环泉^[3-4](图1c)。野外所见到的大部分泉水属于深循环泉,包括侵蚀泉、溢流(出)泉、涌流(出)泉和断层泉等。有些地下水循环很深,获得地下热源加热后,涌出地表成为温泉。表层泉由于地下水循环的最低处大多高于泉口,也可以看成是一种

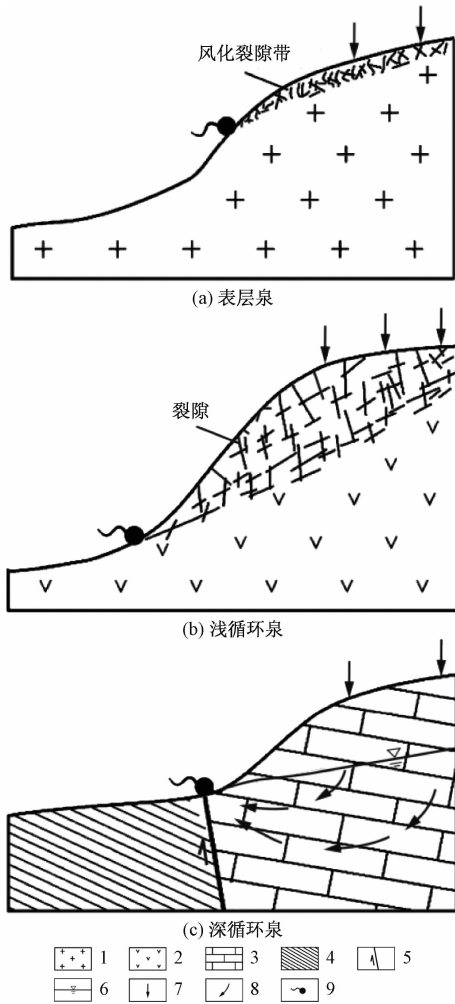


图1 表层泉、浅循环泉和深循环泉示意剖面图
(据文献[3~4],有改动)

Fig.1 Schematic profiles showing the springs of surficial (a), shallow (b) and deep (c) groundwater circulation (Modified after [3~4])

1—花岗岩;2—闪长岩;3—石灰岩;4—页岩;5—断层;

6—地下水位;7—大气降水入渗补给;8—地下水流向;9—泉

特殊的浅循环泉。泉水的这种分类着重考虑了泉水所排泄的含水层中地下水循环(径流)的位置与泉眼位置的相对关系。与深循环泉相比,表层泉和浅循环泉并不是很多见。

浅循环泉有如下特点。(1)地下水在地下循环(径流)的位置浅、深度小,泉眼是其最低之处。(2)浅循环泉多见于基岩山区的山坡地带,出露的位置并不在当地地形的最低处,通常高于附近河流。(3)浅循环泉的补给来源主要为大气降水入渗,在地下径流的途径相对较短。(4)浅循环泉由于没有经历深循环,其水温低,通常是常温泉,几乎不可能是温泉。(5)由于地下径流途径短,地下水与岩石接触时间不长,浅循

环泉水通常为淡水泉,溶解性总固体(TDS)很低。但是,如果地下径流流经含盐地层而溶滤盐分,则浅循环泉的TDS也会很高,成为盐泉^[18~19]。(6)浅循环泉的补给区面积有限,其流量一般不是很大。(7)浅循环泉多是常年性泉,也有部分是季节性泉或暂时性泉,如果遇到长期干旱少雨,浅循环泉就会断流。(8)浅循环泉所排泄的基岩含水层未必存在统一的地下水位。(9)地下水从补给区向泉眼流动并逐渐汇集,主要受到重力的作用。

2 广西北寮岭北坡泉

北寮岭北坡泉(G×6)位于广西兴业县蒲塘镇东北侧北寮岭北坡近坡脚处。该泉水只有一个泉眼,高出最近处的小溪流约30 m,海拔约160 m,水温21~23℃,流量1.0~1.5 L/s,为常年性泉。泉水自山坡岩石裂隙中流出,汇集到一个水池后从4个水管流出。泉水清澈透明、凉爽,被当地人用水瓶运回家中用于做饭,或用于烧开水。饮用者普遍反映此泉水比普通自来水口感更佳。北寮岭北坡泉地处低矮丘陵山区,北寮岭是附近最高、最大的基岩山岭(海拔约420 m),出露地层为侏罗系杂色砂岩。泉水的pH为6.37,TDS仅为23 mg/L(表1),主要离子为 HCO_3^- 和 Ca^{2+} ,毫克当量百分数分别为77.4%和50.0%, Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 次之,毫克当量分别为9.7%、9.7%和27.0%(图2),其他离子含量极低(表1、图3),锂、锶、锌、碘和偏硅酸的含量都没有达到饮用矿泉水标准,水化学类型为 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型, $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ 为1.0。表明该泉水为大气降水入渗补给、地下水在砂岩裂隙中汇集后往低处流出地面而形成(图4a),地下水径流途径短。

3 云南顺荡井盐泉

顺荡井盐泉(YY12)位于云南省云龙县白石镇顺荡井村西侧,澜沧江支流泘江自北往南在西部流过。该盐泉只有一个泉眼,流到一个圆形水池内。泉眼西距泘江约60 m,高出泘江水面约12 m,海拔约2 115 m,水温16.3℃,流量近0.1 L/s,为常年性泉。泉眼出露在山地地带,往东地形升高。顺荡井村是一个古村,过去曾利用该盐泉水生产食盐。顺荡井盐泉地处兰坪盆地中北部,附近地层为白垩上统一古近系古新统紫红色、杂色细砂岩、泥岩夹石膏、石盐。顺荡井盐泉的pH为7.36,TDS高达137 g/L(表1),主要离子为 Cl^- 和 Na^+ ,毫克当量分别为96.6%和95.8%, SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 次之,毫克当量分别为3.2%和3.8%(图2),其他离

表 1 泉水水化学测试结果
Table 1 Hydrochemical analyses of the springs

离子含量 / (mg·L ⁻¹)	广西北寮岭北坡泉 (GX6)	云南顺荡井盐泉 (YY12)	离子含量 / (mg·L ⁻¹)	广西北寮岭北坡泉 (GX6)	云南顺荡井盐泉 (YY12)	离子含量 / (mg·L ⁻¹)	广西北寮岭北坡泉 (GX6)	云南顺荡井盐泉 (YY12)
K ⁺	1.28	96.3	F ⁻	<0.05	1.04	硒 / (mg·L ⁻¹)	/	0.0001
Na ⁺	0.75	49400	NO ₃ ⁻	0.62	<0.1	银 / (mg·L ⁻¹)	/	0.0025
Ca ²⁺	2.6	1730	TDS	23	137000	钼 / (mg·L ⁻¹)	0.071	0.007
Mg ²⁺	0.9	63.2	偏硅酸	13.8	19.1	锰 / (mg·L ⁻¹)	<0.002	0.637
NH ₄ ⁺	<0.02	<0.02	游离 CO ₂	8.8	14.1	铝 / (mg·L ⁻¹)	<0.01	0.08
Fe ²⁺ + Fe ³⁺	0.004	0.121	锂	0.0414	0.312	NO ₂ ⁻ / (mg·L ⁻¹)	0.016	0.004
HCO ₃ ⁻	14.6	246	锶	0.011	3.4	总硬度 / (mg·L ⁻¹)	10	4570
CO ₃ ²⁻	0	0	溴	<0.05	15.5	总碱度	12	202
Cl ⁻	1.1	80600	碘	<0.02	0.03	总酸度	10	16
SO ₄ ²⁻	1.5	3600	锌	<0.001	0.2	pH	6.37	7.36

注: / 表示未测

子含量很低(表 1、图 3),水化学类型为 Cl—Na 型, γ_{Na}/γ_{Cl} 为 0.94,表明该盐泉为大气降水入渗补给、地下水溶滤含盐地层后往低处流出地面而形成(图 4b)。

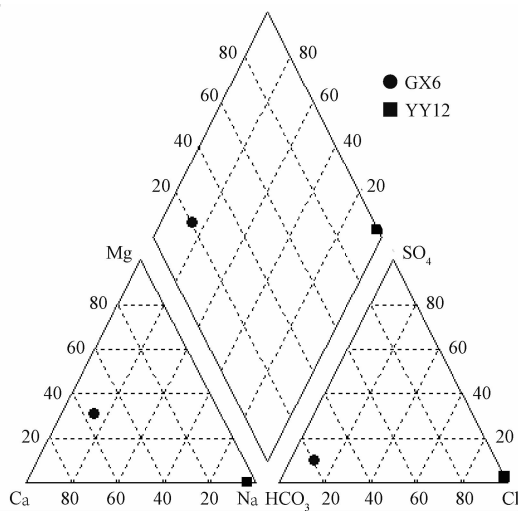


图 2 泉水水样 Piper 图

Fig. 2 Piper diagram showing the spring water samples

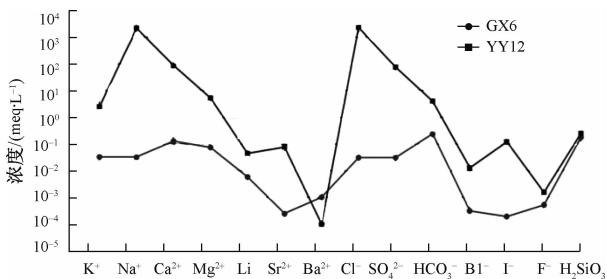
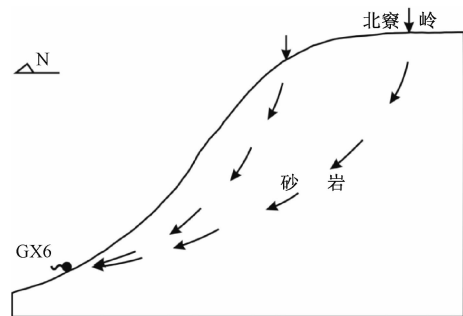
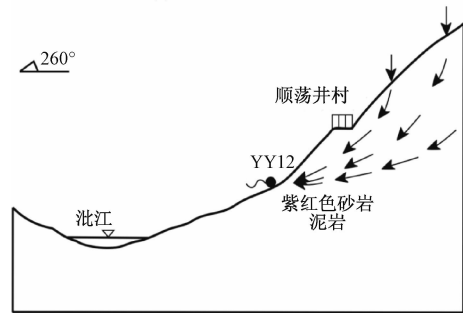


图 3 泉水水样改进的 Schoeller 图

Fig. 3 Modified Schoeller diagram showing the spring water samples



(a) 广西北寮岭北坡泉



(b) 云南顺荡井盐泉

1—大气降水入渗补给;2—示意性地下水流向;3—泉

图 4 广西北寮岭北坡泉和云南顺荡井盐泉形成示意剖面图

Fig. 4 Schematic profiles showing the formation of the Beiliaoling Northern Slope spring in Guangxi and the Shundangjing salty spring in Yunnan

1—大气降水入渗补给;2—示意性地下水流向;3—泉

4 结论

泉可以根据很多因素进行分类。根据泉眼和地下水循环深度(或径流位置)的相对关系,泉水可以分为表层泉、浅循环泉和深循环泉。浅循环泉是指地下水在地下含水层中循环(径流)的最深处仍然高于泉口的泉。深循环泉则指地下水在地下含水层中

循环(径流)的最深处低于泉口的泉。由于岩石裂隙发育随深度减弱,到一定深度甚至裂隙不再发育。当地形切割低于裂隙发育带,地下水有可能以浅循环泉的形式出露。浅循环泉出露的位置并不在地形最低处,一般高于附近河流。地下水受到重力作用,在位置较高的补给区接受大气降水入渗补给后往低处流动并逐渐汇集流出地面。由于在地下径流的途径短、时间短,浅循环泉的流量一般不大,水温与当地多年平均气温接近,其TDS不高。流经和溶滤含盐地层的浅循环泉的TDS可能比较高。广西北寮岭北坡泉和云南顺荡井盐泉是典型的浅循环泉。浅循环泉多是常年性泉,也有一些是季节性泉或暂时性泉。在野外浅循环泉没有深循环泉那样常见。

参考文献:

- [1] Freeze R A, Cherry J A. Groundwater[M]. London: Prentice-Hall, Inc,1979.
- [2] Fitts C R. Groundwater Science[M]. New York: Academic Press,2002.
- [3] 周训,胡伏生,何江涛,等.地下水科学概论[M].北京:地质出版社,2009. [ZHOU X, HU F S, HE J T, *et al.* Introduction to Groundwater Sciences[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)]
- [4] 周训,胡伏生,何江涛,等.地下水科学概论[M]. 2版.北京:地质出版社,2014. [ZHOU X, HU F S, HE J T, *et al.* Introduction to Groundwater Sciences [M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2014. (in Chinese)]
- [5] 王大纯,张人权,史毅虹,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,1995. [WANG D C, ZHANG R Q, SHI Y H, *et al.* Foundation of Hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)]
- [6] 张人权,梁杏,靳孟贵,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,2011. [ZHANG R Q, LIANG X, JIN M G, *et al.* Foundation of Hydrogeology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011. (in Chinese)]
- [7] 中国地质调查局.水文地质手册[M].北京:地质出版社,2013. [China Bureau of Geological Survey. Hydrogeological Manual [M]. Beijing: Geological Publishing House,2013. (in Chinese)]
- [8] Bryan K. Classification of springs [J]. Journal of Geology, 1919, 27(7): 522 - 561.
- [9] Bear J. Hydraulics of Groundwater [M]. London: McGraw-Hill, Inc,1979.
- [10] Alfaro C, Wallace M. Origin and classification of springs and historical review with current applications [J]. Environmental Geology, 1994,24: 112 - 124.
- [11] Fetter C W. Applied Hydrogeology [M]. London: Prentice-Hall, Inc, 2001.
- [12] Pentecost A. Travertine [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [13] Springer A E, Stevens L E. Spheres of discharge of springs [J]. Hydrogeology Journal, 2009, 17: 83 - 93.
- [14] Glazier D S. Encyclopedia of inland waters [J]. Springs,2009,32(11):734 - 756.
- [15] Kresic N, Stevanovic Z. Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management and Sustainability [M]. New York: Elsevier,2010.
- [16] ZHOU X, WANG X C, CAO Q, *et al.* A discussion of up-flow springs [J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2016,4(4): 279 - 283.
- [17] 蒋忠诚,覃小群,劳文科,等.西南岩溶地区表层岩溶水的调查与开发 [C]//中国地质科学院岩溶研究所.中国西南地区岩溶地下水资源开发利用.北京:地质出版社,2006:1 - 10. [JIANG Z C, QIN X Q, LAO W K, *et al.* Investigation and development of the epikarst groundwater in the karstic areas of southwest China [C]//Institute of karst geology of chinese academy of geological sciences. Development and Utilization of Karst Groundwater Resources in Southwest China. Beijing: Geological Publishing House, 2006:1 - 10. (in Chinese)]
- [18] 周训,金晓媚,梁四海,等.地下水科学专论[M].北京:地质出版社,2010. [ZHOU X, JIN X M, LIANG S H, *et al.* Special Topics on Groundwater Sciences[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010. (in Chinese)]
- [19] 周训,曹琴,李双鹏,等.重庆巫溪县宁厂盐泉的形成 [J]. 第四纪研究,2014, 34(5): 1036 - 1043. [ZHOU X, CAO Q, LI S P, *et al.* Formation of the Ningchang salt spring in Wuxi county of Chongqing [J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(5): 1036 - 1043. (in Chinese)]

责任编辑:张若琳