1973—2010 年巴丹吉林沙漠腹地湖泊面积空间变化的遥感分析*

张振瑜^{1,2}, 王乃昂^{1,2**}, 吴月^{1,2}, 沈士平^{1,2}, 张洵赫^{1,2}, 常金龙^{1,2}

(1: 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

(2: 兰州大学干旱区气候变化与水循环研究中心, 兰州 730000)

摘要: 利用 1973、1990、2000、2010 年 4 个时期遥感影像数据, 提取并统计了 1973—1990、1990—2000、2000—2010、1973—2010 年 4 个时期湖泊面积变化信息, 分析了巴丹吉林沙漠湖泊面积变化的空间特征。结果表明, 湖泊数量与面积整体表现为减小, 同时也存在湖泊面积增大与湖泊新增; 1973—2010 年间, 沙漠腹地共干涸 19 个湖泊、新增 7 个湖泊, 43 个湖泊萎缩, 6 个湖泊扩张, 26 个湖泊面积基本保持稳定; 从湖泊面积的空间变化看, 面积减小的湖泊在整个湖泊区域均有分布, 面积增大的湖泊较多分布于研究区东侧, 且多在中东部区域外围, 面积减小剧烈的湖泊在空间上有聚集分布的态势; 湖泊面积变化量在整个空间上并没有表现出显著的正相关关系。湖泊面积变化所表现的空间特征可能由于不同湖泊区域补给来源不同或不同湖泊补给方式存在差异造成的。

关键词: 巴丹吉林沙漠; 湖泊; 遥感; 面积空间变化; 空间自相关

Remote sensing on spatial changes of lake area in Badain Jaran Desert hinterland during 1973—2010

ZHANG Zhenyu^{1,2}, WANG Nai'ang^{1,2}, WU Yue^{1,2}, SHEN Shiping^{1,2}, ZHANG Xunhe^{1,2} & CHANG Jinlong^{1,2}

(1: *College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China*)

(2: *Center for Climate Change and Hydrologic Cycle in Arid Region, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China*)

Abstract: Using remote sensing images in the Badain Jaran Desert in 1973, 1990, 2000, 2010, we got lake area change information and statistics on the desert lakes in different phases, then analyzed the spatial characteristics of lake area changes. Results indicated that there were some new lakes and area increase in some lakes, although the number and the area of lakes were reduced in each period. There are 19 lakes dry-up, 7 lakes new, 43 lakes shrunk, 6 lakes expanded and 26 lakes stabled during 1973—2010. Spatially, the lakes with reduced area were distributed throughout the study area, while the lakes with increased area were mostly located in the east of the study area and in periphery of the middle-eastern region. The lakes with small changes in area were gathered. The lake area changes did not show a significant positive correlation in the entire space. The spatial characteristics of the lake area changes are probably due to different source supplies in different regions or the way of supply varies among the lakes.

Keywords: Badain Jaran Desert; lake; remote sensing; area spatial change; spatial autocorrelation

巴丹吉林沙漠位于内蒙古高原西部阿拉善荒漠的中心, 呈典型大陆性气候, 是我国西北极端干旱区的典型区域^[1]。沙漠腹地南部广泛分布的高大沙山与湖泊引起众多学者的关注^[2-10], 而有关沙漠湖泊演化、地下水来源及水循环机制更是国内外学者研究的热点^[3-16]。近年来随着全球气候变暖 and 干旱化趋势加重, 巴丹吉林沙漠湖泊出现了萎缩、分裂、干涸等现象, 这些湖泊对于维护区域景观多样性有着重要意义, 加强这些湖泊的调查与动态监测, 对沙漠地区生态环境的演化和保护以及湖泊资源的有效利用具有重要意义。

利用遥感手段对巴丹吉林沙漠腹地湖泊面积变化研究表明^[14-15], 近 40 a 沙漠腹地湖泊在数量和面积上

* 国家环保公益性行业科研专项项目(201209034)、兰州大学中央高校基本科研业务费专项项目(lzujbky-2012-136)、教育部博士点新教师基金项目(20100211120006)和国家自然科学基金项目(41101187)联合资助。2012-11-08 收稿; 2012-12-09 收修改稿。张振瑜, 男, 1989 年生, 硕士研究生; E-mail: zhangzhy07@lzu.edu.cn.

** 通信作者; E-mail: wangna@lzu.edu.cn.

均呈减小趋势,但这些研究主要针对湖泊群整体变化进行描述和分析,所得结论也仅局限于所有湖泊数量、面积变化的总和.沙漠湖泊内部变化情况复杂,湖泊群变化的整体情况并不能反映其内部各个湖泊的变化^[15],例如湖泊群面积在减小中存在若干湖泊面积的扩张,湖泊数量减少中也有些湖泊新增.所以,准确掌握湖泊群的变化情况十分必要.与此同时,沙漠湖泊面积变化的空间特征及探讨目前仅限于季节变化^[16],对长时间序列湖泊面积空间变化的研究尚为空白.鉴于此,本文利用 1973—2010 年 4 个时期湖泊面积信息建立湖泊面积空间变化数据库,详尽了解湖泊群内部湖泊变化,利用各湖泊面积变化量做出直观制图表达,分析湖泊变化的时间和空间特征.由于不同湖泊存在湖盆结构、理化性质、水循环特征等各方面差异,湖泊面积空间变化则正是这些差异的综合体现,因此探讨湖泊面积空间变化特征有助于揭示沙漠水循环与补给特征,进而为今后深入探究湖泊水来源等科学问题提供参考.

1 研究区概况

巴丹吉林沙漠位于雅布赖盐湖与雅布赖山西北,宗乃山、省道 S218 以西,黑河正义峡出山口、弱水东岸至古日乃湖以东,合黎山、北大山、黑山头以北,拐子湖、古居延泽以南,东西长约 442 km,南北宽约 354 km,面积 $5.2162 \times 10^4 \text{ km}^2$,是我国第二大沙漠^[17].巴丹吉林沙漠为极端干旱的大陆性气候,蒸发量大,降水稀少,多年平均降水量由东南向西北减小^[4],区内地势总体从西北向东南增加.巴丹吉林沙漠分布有大小湖泊 146 个,其中常年积水湖泊 119 个^[15],主要分布于沙漠东南部.为集中研究沙漠湖泊面积空间变化,选取沙漠东南部湖泊分布集中并常年有水的湖泊区域作为研究区(图 1).

图 1 巴丹吉林沙漠研究区地理位置

Fig. 1 The location of study area in the Badain Jaran Desert

2 数据来源与处理方法

本文数据来源于美国地质调查局(USGS)发布的 1973 年 MSS、1990 年 TM、2000 年 ETM+ 以及 2010 年 TM 数据,共 4 期影像.沙漠湖泊水量受地下水补给与蒸发量多寡的影响较大,湖泊面积和水位存在明显的年内差异^[16],影像的选择必须是湖泊水位最稳定的时期.在巴丹吉林沙漠,湖泊最高水位出现在春季,较低

水位出现在秋、冬季节,夏季是湖泊水位剧烈变化的时期. 为排除湖泊年内变化对其阶段变化的影响,所有影像均采用秋季平水期的数据,同时也避开了冬季湖面的冰冻时期. 影像日期分别为 1973 年 10 月 7 日、1990 年 9 月 17 日、2000 年 9 月 20 日和 2010 年 8 月 23 日,影像质量良好,云量均小于 1%. 在遥感软件的支持下对影像进行了校正、拼接、裁剪、投影等预处理.

湖泊的提取要尽量做到精确、快速、自动化. 由于沙漠环境中水体与其他地物特殊的光谱特性,传统的影像分类、阈值分割和水体指数不能准确排除其他地物对湖泊边界的影响. 因此,本文采用朱金峰等^[16]提出用以提取沙漠湖泊的水体指数——DLWI 对湖泊范围进行界定. 对于 1973 年的 MSS 影像,较低的空间分辨率使得误提取对结果影响较大,考虑到方法与精度的问题,首先对影像进行图像增强,然后根据多次沙漠湖泊考察结果,人工判读出像元数不少于 3 个的湖泊边界. 最后利用 GIS 工具对所得湖泊信息进行后处理,包括剔除误判、统一湖泊统计指标、统计湖泊面积和周长、建立湖泊空间数据库等. 湖泊信息后处理与提取结果见文献[15].

巴丹吉林沙漠各湖泊面积变化量之间的相互关系与相关程度,可用空间自相关理论进行统计. 本文采用最常见、应用最广泛的全局 Moran's I 指数统计量来探寻湖泊面积变化量的自相关性. 全局 Moran's I 的公式为:

$$I = \frac{\sum_i^n \sum_j^n W_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_i^n \sum_j^n W_{ij}} \tag{1}$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2 \tag{2}$$

式中, n 是空间单元数, x_i 和 x_j 分别表示对象在 i 处和 j 处的变量值,且 $i \neq j$. 空间权重矩阵 W_{ij} 定义了对各对象的相互邻接关系,若两个对象相邻,空间权重值 W_{ij} 为 1,否则为 0. Moran's I 指数用标准化统计量 Z 值的 P 值检验来确定自相关的显著性水平.

3 湖泊变化分析与讨论

3.1 湖泊变化总体趋势

表 1 湖泊变化结果统计
Tab. 1 The statistical results of lake changes

时期	干涸	萎缩	稳定	扩张	新增
1973—1990 年	16	38	34	6	9
1990—2000 年	2	22	47	16	13
2000—2010 年	16	27	51	4	0
1973—2010 年	19	43	26	6	7

利用建立的湖泊面积变化空间数据库,根据湖泊面积变化率将研究区湖泊变化情况分为 5 类,对 5 种类型的湖泊数量进行统计(表 1). 湖泊面积变化率 $R = (A_2 - A_1)/A_1$, A_1 、 A_2 分别表示 T_1 、 T_2 时期各湖泊的面积,本文取 $R_0 = 0.1$ 作为界定湖泊变化的阈值.

4 个时段内萎缩与干涸的湖泊整体多于扩张与新增的湖泊,表明近 40 a 巴

丹吉林沙漠水资源整体表现为减少的特点. 1973—1990 年、1990—2000 年、2000—2010 年 3 个时间序列较短的时段,各类型湖泊数量特点基本表现为:稳定的湖泊 > 萎缩的湖泊 > 扩张的湖泊 > 干涸湖泊 > 新增湖泊(1990—2000 年略有不同);在整体的 37 a 间,萎缩的湖泊数量最多,达 43 个,其次是稳定的湖泊与干涸湖泊,扩张的湖泊与新增湖泊数量最少,仅分别为 6 个和 7 个;值得注意的是,1990—2000 年,新增湖泊最多而干涸湖泊最少,部分干涸湖泊水量又重新恢复,而该时期仍然为湖泊群面积减少的时期^[14-15](表 1);以上特征均表明巴丹吉林沙漠湖泊变化情况复杂,湖泊群中部分湖泊在不同时期内表现出了不同的变化特点.

3.2 湖泊面积变化自相关分析

湖泊面积变化量的全局自相关系数结果显示,4 个时期 Moran's I 指数均为正值(表 2). 进一步对计算结果进行近似正态分布的显著性检验,正态分布 95% 置信区间双侧检验阈值 $Z_{0.05} = 1.96$, Z 值均小于 1.96,

所有 P 值均未通过信度为 0.05 的显著性检验(表 2),表明 4 个时期沙漠各湖泊面积变化量在整个空间上正相关关系并不显著。

显著的空间正相关说明地理变量在空间上存在明显的集聚模式,究其原因往往因为这些变量受某些因素的显著影响,致使这些变量存在“空间依赖”。巴丹吉林沙漠湖泊之间不仅空间位置不同,湖泊的理化性质^[18-21]、湖盆结构^[1]、补给方式、补给来源也有差别^[3-4,6-8,10-12],加之沙漠下部存在地质构造、断裂破碎带的影响^[4,6-7],这些差别的存在致使各湖泊间有较大“距离”差异。笔者推断,湖泊面积变化量整体上未呈现出显著自相关关系,是因为这些湖泊没有受到某种或某些因素的显著影响,或者这些因素对不同湖泊的影响程度有所不同造成的。

3.3 湖泊面积变化空间特征及讨论

为方便分析湖泊面积变化空间特征,利用已建空间数据库对各时期湖泊变化量进行制图。1973—2010 年湖泊面积变化量在空间上的分布位置可知,面积减小的湖泊在整个湖泊区范围均有分布,多数湖泊面积减少量小于 0.05 km^2 ;东西方向上,面积增大的湖泊大多分布于湖泊群东侧区域,仅有 1 个面积增大不明显的湖泊分布于湖泊区偏西侧;南北方向上,湖泊群北部区域面积增大的湖泊很少,其中面积增加较大的湖泊分布相对集中于 39.8°N 附近(图 2)。

图 2 1973—2010 年巴丹吉林沙漠湖泊面积变化量的空间分布位置

Fig.2 The spatial distribution of lake area changes in the Badain Jaran Desert during 1973—2010

根据反距离加权原理,对不同时期湖泊面积变化量在研究区范围内插值。1973—1990 年、1990—2000 年、2000—2010 年、1973—2010 年 4 个时期湖泊变化空间分布格局,直观表现了湖泊区湖泊变化的时间、空间特征(图 3)。

1) 1973—1990 年,研究区北部多数湖泊,包括中部的浩尼吉林—巴伦敖勒斯图一线,准散根吉林、昭尔格图一带,以及研究区东南部部分湖泊为湖泊面积减小明显的区域,范围遍及整个研究区。面积扩张的湖泊分布在研究区中东部地区,典型湖泊有呼和吉林、音德尔图、呼都格吉林、扎木呼都格等,位于研究区中部的哈拉木格图面积也扩大,其余湖泊面积变化量较小。

2) 1990—2000 年,湖泊面积变化趋于稳定,面积减小的湖泊主要集中在研究区中部以哈拉木格图为中心的区域,另外巴彦诺尔与伊和吉格德面积减小亦较为明显。研究区中东部的包尔准特—查干脑亥图一线与

图3 4个不同时段湖泊面积变化量空间分布格局

Fig. 3 The spatial pattern of the lake area changes during four different periods

毛日图、南部的交斯图、通古图、西北角的西诺尔图是湖泊面积增大的主要区域。

3) 2000—2010年,是湖泊变化最为稳定的一个时期,面积变化明显的湖泊数量也最少,几乎没有明显的湖泊面积减小的区域。研究区东部的包尔准图与音德尔图,北部的乌尔塔布拉格与巴彦诺尔,中部的布尔特和车日格勒是面积扩大明显的湖泊。

4) 整体而言,1973—2010年有3个湖泊面积明显减小的区域,分别位于研究区偏西北部、东南缘部分淡水湖泊以及研究区中东部以浩尼吉林为中心的湖泊区域,而且湖泊面积减小程度在4个时期中最大。湖泊面积扩大的区域主要在研究区中东部呼和吉林—塔马英一线,还包括包尔准图和乌兰吉林,皆分布于浩尼吉林萎缩区外围。

5) 从湖泊面积变化剧烈程度可以看出,1973—1990年、1990—2000年、2000—2010年3个时期湖泊面积变化剧烈程度依次减弱,这与前人研究结果一致^[14]。1973—2010年湖泊面积变化程度最为剧烈,面积变化显著的湖泊数量也最多,这是因为该时期湖泊变化是其余3个时期湖泊变化累积的结果,虽然各时期湖泊面积变化情况不尽相同,但多数湖泊面积变化方向基本一致,所以阶段性变化结果加大了最终状态与原状态之间的差异。

6) 从4期湖泊面积变化空间分布可以看出,面积增大的湖泊主要分布于东部,特别是增大明显的湖泊多分布于中东部区域的外围,典型湖泊包括包尔准特、呼和吉林、音德尔图、小海子、阿拉特图、塔马英、扎拉特、乌兰吉林等。值得一提的是,研究区最东部的包尔准特近年来面积连续扩张,共增加了0.048 km²。面积减小的湖泊分布于整个研究区域,面积减小剧烈的湖泊往往有聚集分布的态势。

巴丹吉林沙漠人烟稀少,沙漠腹地湖泊区居民不足30户,生产方式以放牧为主,所以研究区湖泊面积变化基本不受人类活动的影响。内陆湖泊的面积变化与水量变化趋势一致,对于地处极端干旱区的沙漠湖泊,湖泊面积变化由其各自汇水区水量收支状况所表现,水量收入部分除降水直接补给外还有地下水的

补给,支出部分为湖泊水面蒸发。

研究区南缘最近两个气象站点降水观测记录显示(图4)^[22],近40 a 两地多年平均降水量阿拉善右旗为117.6 mm,雅布赖镇为89.7 mm。从变化趋势上看两地降水量均略有增加,但均未通过信度为0.05的显著性检验。两地降水虽有差别但不是很大,研究区域地表均一、地形相似,故其外围两地年均降水量27.9 mm的差别不会导致腹地不同湖泊区域降水量的巨大差异。另外根据本研究组对湖泊区水量平衡的讨论,降水对湖泊水量变化的贡献率仅约为10%^[23],因此在长时间尺度上,湖泊面积空间变化所表现的特征并非降水变化所致。

湖泊蒸发方面,巴丹吉林沙漠湖泊年蒸发量大于1000 mm^[3],本研究组实地观测发现,湖水蒸发存在“盐度效应”,即不同盐度的湖泊蒸发量并不相等^[24]。虽然不同盐度湖泊蒸发存在差别,但观测结果并未出现蒸发量间数量级或倍数的巨大差异。其次,将2010年9月沙漠湖泊水化学分析结果^[25]与湖泊面积变化进行对比,发现TDS值高的湖泊不仅存在于面积增大的湖泊,也存在于面积减小的湖泊中,同样TDS值较低的湖泊也同时存在于面积增大与减小两类湖泊中。湖泊TDS值的高低与湖泊面积变化特点并没有表现出对应关系,因此可以说二者不存在必然联系。根据以上两点,湖水蒸发的“盐度效应”对蒸发量的影响并没有在湖泊面积变化中得到相应证实,说明湖泊间的蒸发差异亦不是导致湖泊空间变化特点的根本原因。

巴丹吉林沙漠湖泊中分布有相当数量的泉眼,深层泉水源源不断对湖泊水量的补给是维系湖泊水量相对稳定的重要原因之一^[4,6,8]。另外,分布于沙层下的浅层地下水也可能对湖泊有一定的补给作用。在伊克力敖包褶皱带南北两侧,沙漠湖泊水化学成分存在明显差异,马妮娜等^[18]指出南北湖泊补给来源可能来自不同的方向。仅一丘之隔的巴丹东湖与巴丹西湖,其水化学特征迥然不同的原因在于2个湖泊接受地下水补给量不同^[18]。刘建刚^[8]认为,处于同一沙漠相同环境气候条件下的湖泊,矿化度的不同反映了湖泊水的补给来源、补给强度和补给量等存在差别。

基于以上,我们有理由认为近40 a 巴丹吉林沙漠腹地湖泊面积变化表现出的空间特征是由不同湖泊区域补给来源不同或不同湖泊补给方式存在差异所致。同时,这些补给来源与补给方式之间的差异也可能是导致不同湖泊理化特性存在差异的主要原因。

上文3.2节中湖泊面积变化量空间自相关的计算得到面积变化量在整个空间上并没有表现出显著正相关关系,湖泊之间面积变化不存在明显的空间依赖。虽然空间自相关的计算仅是统计学意义上的值,但其在一定程度上可以说明在湖泊面积变化中深层地下水的补给更可能影响湖泊面积的变化。由于目前湖泊水来源存在争议,又缺乏各自湖泊精确的水量平衡计算,所以有关影响湖泊面积空间变化的各因素贡献率的大小仍需探讨。

4 结论

本文利用1973、1990、2000、2010年4期秋季遥感影像,准确提取了巴丹吉林沙漠腹地湖泊边界信息,建立了湖泊面积变化空间数据库,运用统计分类、空间自相关、湖泊变化空间制图的方法,获得近40 a 沙漠湖

图4 1970—2010 年巴丹吉林沙漠南缘阿拉善右旗与雅布赖镇降水变化^[22]

Fig.4 Variation of precipitation at Alxa Right Banner and Yabra in the southern Badain Jaran Desert during 1970–2010

泊面积变化规律为:(1)近40 a间,沙漠腹地共干涸19个湖泊,新增7个湖泊.面积减小的湖泊有43个,面积增大的湖泊有6个.(2)空间分布上,面积减小的湖泊在整个湖泊区域均有分布,面积增大的湖泊较多分布于研究区东侧,且多在中东部区域外围;面积减小剧烈的湖泊在空间上有聚集分布的态势.(3)湖泊面积变化量在整个空间上没有表现出显著正相关关系,湖泊面积变化的空间特征可能是不同湖泊区域地下水补给来源不同或不同湖泊存在补给方式的差异所致.

巴丹吉林沙漠湖泊变化复杂,由于目前湖泊水补给来源与补给途径上存有很大争议,并缺乏对湖泊自身形态、湖盆结构、理化性质等研究,使得本文在定量解释湖泊面积变化方面尚存欠缺.结合本研究团队建立在沙漠腹地的观测实验站资料,精确计算湖泊水量平衡,定量分析湖泊水循环中各成分贡献率,是进一步研究的重点.

致谢:本文在写作修改过程中得到兰州大学地球系统科学研究所黄银洲博士与马宁硕士的帮助,特此感谢.

5 参考文献

- [1] 王涛. 巴丹吉林沙漠形成演变的若干问题. 中国沙漠, 1990, 10(1): 29-40.
- [2] 杨小平. 巴丹吉林沙漠地区钙质胶结层的发现及其古气候意义. 第四纪研究, 2000, 20(3): 295.
- [3] Yang XP, Liu TS, Xiao HL. Evolution of megadunes and lakes in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China during the last 31000 years. *Quaternary International*, 2003, 104: 99-112.
- [4] 陈建生, 赵霞, 盛雪芬等. 巴丹吉林沙漠湖泊群与沙山形成机理研究. 科学通报, 2006, 51(23): 2789-2796.
- [5] Gates JB, Edmunds WM, Darling WG *et al.* Conceptual model of recharge to south eastern Badain Jaran Desert groundwater and lakes from environmental tracers. *Applied Geochemistry*, 2008, 23(12): 3519-3534.
- [6] Chen JS, Li L, Wang JY *et al.* Groundwater maintains dune landscape. *Nature*, 2004, 432: 459-460.
- [7] 丁宏伟, 王贵玲. 巴丹吉林沙漠湖泊形成的机理分析. 干旱区研究, 2009, 24(1): 1-7.
- [8] 刘建刚. 巴丹吉林沙漠湖泊和地下水补给机制. 水资源保护, 2010, 26(2): 18-23.
- [9] 马金珠, 陈发虎, 赵华. 1000年以来巴丹吉林沙漠地下水补给与气候变化的包气带地球化学记录. 科学通报, 2004, 49(1): 22-26.
- [10] 张虎才, 明庆忠. 中国西北极端干旱区水文与湖泊演化及其巴丹吉林沙漠大型沙丘的形成. 地球科学进展, 2006, 21(5): 532-537.
- [11] Yang X, Ma N, Dong J *et al.* Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, western China. *Quaternary Research*, 2010, 73: 10-19.
- [12] 陈建生, 凡哲超, 汪集旻等. 巴丹吉林沙漠湖泊及其下游地下水同位素分析. 地球学报, 2003, 24(6): 497-504.
- [13] 来婷婷, 王乃昂, 黄银洲等. 2002年腾格里沙漠湖泊季节变化研究. 湖泊科学, 2012, 24(6): 957-964.
- [14] 熊波, 陈学华, 宋孟强等. 基于RS和GIS的沙漠湖泊动态变化研究——以巴丹吉林沙漠为例. 干旱区资源与环境, 2009, 23(8): 91-98.
- [15] 张振瑜, 王乃昂, 马宁等. 近40a巴丹吉林沙漠腹地湖泊面积变化及其影响因素. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1743-1750.
- [16] 朱金峰, 王乃昂, 李卓仑等. 巴丹吉林沙漠湖泊季节变化的遥感监测. 湖泊科学, 2011, 23(4): 657-664.
- [17] 朱金峰, 王乃昂, 陈红宝等. 基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1087-1094.
- [18] 马妮娜, 杨小平. 巴丹吉林沙漠及其东南边缘地区水化学和环境同位素特征及其水文学意义. 第四纪研究, 2008, 28(4): 702-711.
- [19] 陆莹, 王乃昂, 李贵鹏等. 巴丹吉林沙漠湖泊水化学空间分布特征. 湖泊科学, 2010, 22(5): 774-782.
- [20] 邵天杰, 赵景波, 董治宝. 巴丹吉林沙漠湖泊及地下水化学特征. 地理学报, 2011, 66(5): 662-672.
- [21] 陈立, 王乃昂, 王浩等. 巴丹吉林沙漠湖泊与地下水化学参数初步研究. 中国沙漠, 2012, 32(2): 531-538.
- [22] 马宁, 王乃昂, 李卓仑等. 1960—2009年巴丹吉林沙漠南北缘气候变化分析. 干旱区研究, 2011, 28(2): 242-250.
- [23] 董春雨. 阿拉善沙漠水循环观测实验与湖泊水量平衡[学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [24] 沈士平, 王乃昂, 马宁等. 巴丹吉林沙漠咸-淡水蒸发量对比及其影响因素分析. 自然地理学与生态安全学术论文摘要集. 兰州: 兰州大学, 2012: 18.
- [25] 陆莹. 巴丹吉林沙漠湖泊水化学时空变化特征及其成因初探[学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2012.