

蒙新高原湖泊水质状况及变化特征^{*}

曾海鳌, 吴敬禄

(中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘 要: 蒙新高原位于干旱/半干旱气候区, 区内湖泊众多, 但多为盐湖和咸水湖。近年来, 由于湖泊咸化、萎缩甚至干涸的过程加快, 区内多数湖泊水资源严重短缺, 湖泊及其流域的生态环境遭遇巨大破坏。本文选取蒙新地区 11 个淡水和微咸水湖泊, 通过对不同区域和不同类型的湖泊水质状况分析和对比研究, 揭示蒙新地区湖泊水质现状及其变化特征与原因。结果表明, 新疆地区湖泊类型多样, 湖水阴、阳离子涵盖了各种水化学类型, 而内蒙湖泊均为钠组-氯化物型。不同湖泊间湖水离子浓度和矿化度差异较大, 湖水交换是蒙新地区湖泊水体矿化度的主要影响因素; 与 1988 年相比, 哈纳斯湖、阜康天池和赛里木湖等山地湖泊矿化度无明显变化或呈下降趋势, 反映了区域气候变化特征; 柴窝堡湖和红碱淖湖水矿化度快速升高, 而达里诺尔水体矿化度增幅较小, 其差异反映了修筑水库、地下水开采等人类活动在湖泊水环境变化中的不同作用。近 50 年来, 乌伦古湖、博斯腾湖、吉力湖和乌梁素海水体矿化度波动升高, 尤其近年来矿化度升高趋势加快, 反映了流域内工农业等人类活动增强而导致入湖污染物增加以及气候干旱引起湖水浓缩两个方面所产生的叠加效应。

关键词: 蒙新高原; 干旱/半干旱地区; 湖泊; 水质变化; 人类活动; 气候变化

Lake status of water quality and the changes in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau

ZENG Hai'ao & WU Jinglu

(State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

Abstract: Lakes are abundant in the arid/semi-arid region of Inner Mongolia-Xinjiang Plateau, but many of them are salt lakes and saline lakes so that the lake water resources are poor. In recent years, most lakes in the region have quickly becoming salty, area withered and dry, which greatly damaged the ecological environments of the lakes and their catchments. Eleven fresh and slight saline lakes in this region were chosen to investigate. Based on the analysis of the water quality status and their discrepancy, the characteristics and reasons of the water quality variety were explored. Our results showed that Na^+ and SO_4^{2-} were the dominant ions within the lake water of Inner Mongolia, while the lake water in Xinjiang were dominant by multiple ions. The ions and total dissolved solid concentrations (TDS) of lake water were different with the water exchange variety. TDSs of lakes surround by mountains, including Lake Kanasi, Fukangtianchi and Sailimu Lake, were stable between 1988 and 2008, which reflected the climate change of the region. The TDSs of Lake Caiwopu and Lake Hongjiannao increased quickly while that of Dalinuo increased slowly, which were impacted by anthropic activities including reservoir building and groundwater exploitation. During the past fifty years, fluctuations of the TDS concentrations in Lake Wulungu, Lake Bosten, Lake Jili and Lake Ulansuhai raised and increased recently because of climatic drying and the development of industry and agriculture.

Keywords: Inner Mongolia-Xinjiang Plateau; lakes; arid and semi-arid regions; water quality; human activities; climate changes

蒙新地区总面积 $280 \times 10^4 \text{ km}^2$, 区内大于 1 km^2 湖泊总面积约 19700 km^2 , 占全国湖泊总面积的 21.5%, 但淡水和微咸水湖泊数量少、储水量小, 水资源贫乏。蒙新湖泊地处内陆、气候干旱、降水稀少、地表径流补给

^{*} 科技部基础性工作专项“中国湖泊水质、水量和生物资源调查”项目(2006FY110600)、国家自然科学基金项目(40971117)和中国科学院南京地理与湖泊研究所人才启动项目(NIGLAS2009QD08)联合资助。2010-06-30 收稿; 2010-09-20 收修改稿。曾海鳌, 男, 1980 年生, 博士; E-mail: zenghaiao@niglas.ac.cn.

不丰,蒸发强度超过湖水的补给量,湖泊逐渐咸化,总体演化趋势为逐渐萎缩^[1].近50年来,现代人类活动对蒙新地区土地资源的大规模开发,造成入湖径流急剧减少,湖泊水资源在降水稀少的干旱气候背景下蒸发强烈,加上人为因素的影响,湖泊缺乏水源补给,造成湖泊水资源严重短缺,湖面迅速萎缩、水质咸化并向盐湖发展,部分湖泊最终形成干涸的荒漠^[2].而部分湖泊由于接受流域排放的大量污染物,面临严峻富营养化的威胁^[3-5],严重危及湖泊及其相邻区域的生态环境,带来一系列环境问题,包括:湖泊鱼类减少、消失,生物多样性减少;环湖地区生态环境恶化,荒漠化加剧;农牧业生产和居民生存受到极大威胁等等^[6-7].目前,对于蒙新地区单个湖泊的水环境问题已有部分研究,但对于大范围的湖泊水质状况研究缺乏,使得对该区域湖泊水环境变化的过程和原因缺乏深入的理解.本文选取了11个蒙新地区淡水和微咸水湖泊,通过对不同区域和类型的湖泊水质状况分析(尤其是水体矿化度)和对比研究,揭示蒙新地区湖泊水质现状及其变化特征与原因,为区域内的湖泊治理对策提供依据.

1 区域位置概况

蒙新地区地貌以波状起伏的高原或山地与盆地相间分布的地形结构为特征,河流和潜水向洼地中心汇聚,一些大中型湖泊往往成为内陆盆地水系的尾间和最后归宿地,发育成众多的内陆湖泊,只有个别湖泊如额尔齐斯河上游的喀纳斯湖、黄河河套地区的乌梁素海等为外流湖^[1].区内地形复杂,气候垂直分带明显,湖泊类型多样,山地、平原等不同地貌单元皆有湖泊分布.由于地处内陆、气候干旱、降水稀少,地表径流补给不丰,蒸发强度较大以致超过湖水的补给量,湖水因不断被浓缩而发育成闭流类的咸水湖和盐湖,淡水和微咸水湖泊数量很少.本研究选取的11个淡水和微咸水湖泊分别为新疆地区的赛里木湖、喀纳斯湖、吉力湖、阜康天池、博格达湖、博斯腾湖;内蒙古地区的乌梁素海、哈素海、红碱淖;陕西的红碱淖(图1).

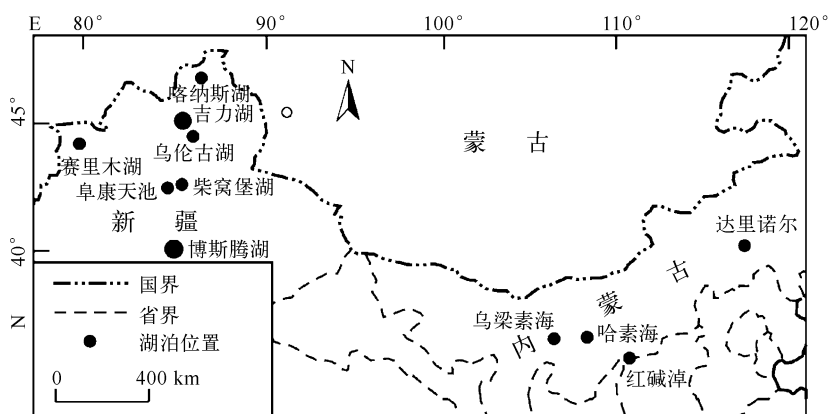


图1 蒙新高原湖泊位置分布

Fig. 1 The locations of the lakes in the region of Inner Mongolia-Xinjiang Plateau

2 采样与实验分析

2008年7月至9月对蒙新高原11个特征典型湖泊(淡水和微咸水)的水质状况进行调查,根据湖泊面积、湖盆形态、湖泊水动力条件和流域补给等布置采样点数目与位置.现场采用YSI 6500多参数水质分析仪测定湖水矿化度(TDS)、盐度、pH值和电导率(Cond);采用黑白盘法测量湖水透明度(SD);碱度采用酚酞和甲基橙指示剂现场滴定分析;总氮(TN)和总磷(TP)经过硫酸钾高压消解后用紫外分光光度法测定.阴、阳离子测定水样现场经0.45 μm的Watman玻璃纤维滤膜过滤后,加入HNO₃调整pH值到2以下保存.运回实验室后,K⁺、Na⁺、Ca²⁺和Mg²⁺采用ICP-MS分析仪测定;Cl⁻和SO₄²⁻测定采用离子色谱法;采用SPSS13.0对数据进行统计分析.

3 结果与讨论

3.1 蒙新典型湖泊水化学指标统计

蒙新典型湖泊水化学指标统计结果表明,由于所研究的湖泊涵盖了淡水湖和微咸水湖,除 pH 值外,不同湖泊的水化学指标差异较大(图 2). 矿化度变化范围为 0.04 – 6.22g/L,透明度为 1.80 – 11.15m,电导率为 0.04 – 7.84 μ S/cm,总氮为 0.09 – 4.19mg/L,碱度(Alk)为 19.5 – 2199mg/L,硬度(Hard)为 16.47 – 1561.25mg/L, Cl^- 浓度变化范围为 0.25 – 1557mg/L, SO_4^{2-} 浓度为 1.63 – 3255.31mg/L, Na^+ 为 1.01 – 2218mg/L, Mg^{2+} 为 0.78 – 363.33mg/L. 在所研究的 11 个湖泊中,内蒙古的达里诺尔水体 TDS、Alk、pH 值、TN、TP、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和 Na^+ 均为最高值,哈纳斯湖各化学指标均为最低值,柴窝堡湖 SO_4^{2-} 浓度最高,赛里木湖 Hard、SD 和 Mg^{2+} 浓度最高.

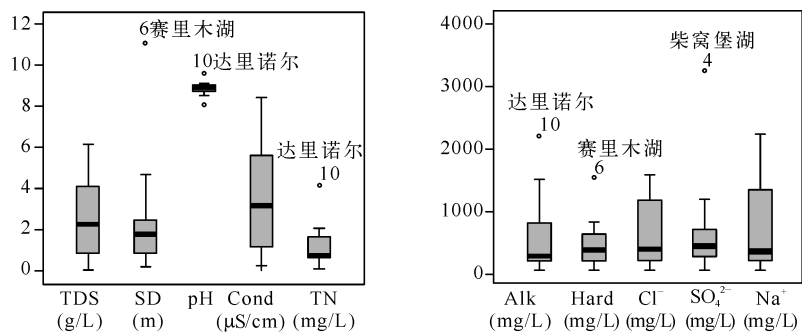


图 2 蒙新高原特征湖泊水化学指标统计结果

Fig. 2 The statistic results of water chemical parameters of the lakes in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau

3.2 蒙新典型湖泊水化学组成

蒙新地区不同区域的湖泊水化学组成存在明显差异,阴、阳离子涵盖了各种水化学类型,矿化类型为 I 型和 II 型水,如图 3 所示(实线方框内代表内蒙地区湖泊,其余为新疆地区的湖泊). 新疆地区的湖泊水体化学组成丰富,水体阳离子涵盖了钙、镁和钠离子型,水体阴离子为碳酸盐和硫酸盐型;内蒙古地区湖泊水体化学组成相对单一,阳离子为钠型,阴离子为氯化物型.

蒙新地区不同地貌类型的湖泊之间,水化学组成也存在明显差异,山地湖泊水化学类型阴离子为碳酸盐型,阳离子为钙或镁型;其余湖泊阴离子为硫酸盐和氯化物型,阳离子为钠型(图 3,虚线椭圆框内代表山地湖泊). 但柴窝堡湖、红碱淖和达里诺尔的对应该水型离子的相对百分含量更高,柴窝堡湖水体硫酸盐占总阴离子的 87.29%,红碱淖和达里诺尔水体中钠离子分别占总阳离子的 92.45% 和 97.94%.

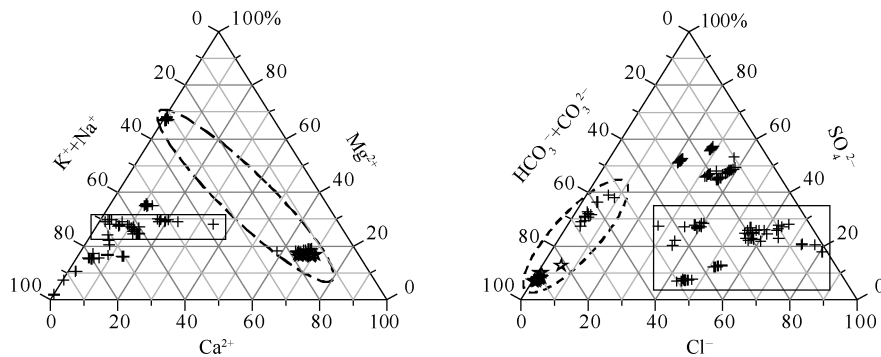


图 3 蒙新高原典型湖泊水化学三角图

Fig. 3 Piper plots of lake water samples in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau

与 1988 年蒙新地区各湖泊水化学类型^[1]相比,吉力湖和乌伦古湖水化学类型由氯化物钠组 II 型水转化为硫酸盐钠组 II 型水,红碱淖由重碳酸盐钠组 I 型水转化为氯化物钠组 I 型水,其余湖泊水化学类型未发生变化.根据调查结果,进入乌伦古湖和吉力湖的额尔齐斯河和乌伦古湖河水的硫酸盐含量明显高于氯离子,河水输入是引起这两个湖泊水化学类型变化的主要原因.而红碱淖则是由于在湖泊水位下降,水量减少的情况下,形成碳酸盐沉淀,而导致氯化物含量以及比例增大.

3.3 蒙新湖泊矿化度分布特征

对于蒙新地区而言,矿化度是湖泊水体污染的主要指标,2008 年各湖泊矿化度见图 4. 阜康天池、喀纳斯湖和赛里木湖为山地湖泊,但赛里木湖矿化度高达 3.039g/L(甚至比一些平原/盆地湖泊更高),而喀纳斯湖和阜康天池矿化度分别为 0.041 和 0.119g/L. 原因在于赛里木湖是一个封闭性的山地湖泊,湖水在流域和湖泊内部的循环交换过程中,矿物质不断溶解进入湖泊,使水体矿化度逐渐增加到较高水平.而喀纳斯湖和阜康天池为开放型湖泊,入湖矿物质随出流湖水不断排出,因而可以维持着优质的低矿化度水.其余非山地湖泊中,乌伦古湖、博斯腾湖、吉力湖、乌梁素海和哈素海的矿化度范围为 0.6~2.89g/L,柴窝堡湖、红碱淖和达里诺尔相对较高,矿化度高达 5.30~6.22g/L. 乌伦古湖和博斯腾湖分别有来源于额尔齐斯河和开都河的入湖河水,吉力湖有乌伦古湖河水的补给,乌梁素海和哈素海受黄河河水的补给,入湖补给量相对较大,其矿化度相对较低.而柴窝堡湖、红碱淖和达里诺尔的湖水主要依赖湖面降水和地表径流补给,长期的蒸发浓缩作用使湖泊水体矿化度更高.因此,湖水的交换是蒙新地区湖泊水体矿化度的主要影响因素.

3.4 蒙新湖泊矿化度变化特征与原因

湖泊水质受降水量、入湖径流、蒸发量及温度等气候因素的影响,大量研究表明,干旱/半干旱区湖泊的水化学性质与气候变化有密切的关系^[8-13],而人类活动在湖泊水质变化中起重要作用^[14-17],在两者共同作用下,蒙新地区不同类型的湖泊水化学变化特征存在明显差异.

蒙新地区湖泊 1988 年^[1]和 2008 年矿化度对比结果表明(图 4),矿化度增长较大的湖泊主要有柴窝堡湖、红碱淖、吉力湖和乌梁素海,增长较小的湖泊有达里诺尔、乌伦古湖和哈素海,基本不变或呈下降趋势的有赛里木湖、喀纳斯湖和博斯腾湖.近年来,新疆地区降水量呈增加趋势^[18],赛里木湖流域气温呈波动上升^[19],冰川消融加快引起湖泊补给量增加,加上流域内的人类活动影响较小,因而山地湖泊(赛里木湖和喀纳斯湖)水位变化较小,湖水矿化度也基本不变或略微增大.矿化度相对高的三个湖泊中,柴窝堡湖和红碱淖水体矿化度分别增加了 58.8% 和 53.6%,而达里诺尔的增加幅度仅为 8.1%.一方面原因在于蒙新地区区域降水量小、蒸发量大,致使湖泊矿化度处于增大状态.另一方面,人类活动也有重要影响.研究表明,2000 年后红碱淖面积不断减小的主要原因是在入湖河流上游修建水库,减小了地表水对湖水的补给;红碱淖流域内大量开采地下水,致使地下水对湖水的补给减小^[20-21].1990 年前,由于冰川融水和地下水的补给,柴窝堡湖水量变化很小^[22],1992 年以后,建成水源地进行大量开发^[23].柴窝堡湖周围地下水 2002 年总取水量达 $5118 \times 10^4 \text{ m}^3$,2006 年更高达 $5492 \times 10^4 \text{ m}^3$,水源地大量开采地下水,导致水源地地下水位出现明显下

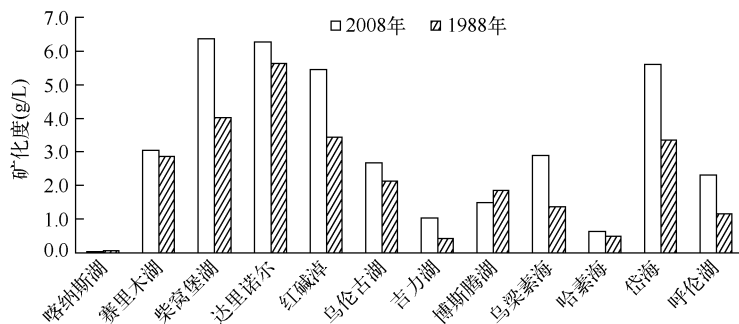


图 4 蒙新高原湖泊 1988 年和 2008 年矿化度对比
(1988 年湖泊水体矿化度数据来源文献[1])

Fig. 4 The contrast of TDS of the lakes in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau between 1988 and 2008

降趋势. 而柴窝堡湖地下水补给占总来水量的 90.4%, 地下水入湖量的减少引起湖泊水位的下降^[24]. 达里诺尔人类活动影响相对较弱, 因此增加幅度较小. 通过 1988 年和 2008 年这三个湖泊矿化度的变化对比, 证明了人类活动(主要是修筑水库和地下水开采等)在湖泊水环境变化中的重要作用.

对于乌伦古湖、博斯腾湖、吉力湖和乌梁素海而言, 自然和人类活动对湖泊的影响与柴窝堡湖和红碱淖有所差别, 因此我们对这些湖泊近 50 年来的矿化度变化进行了进一步分析. 2008 年之前蒙新地区各湖泊水体矿化度数据来源于文献^[1, 25-27], 其变化趋势见图 5. 从博斯腾湖矿化度变化曲线来看, 20 世纪 50 年代到 90 年代, 博斯腾湖的矿化度呈上升趋势, 90 年代到 2002 年矿化度呈降低趋势, 但是 2002—2008 年间湖水矿化度又呈现上升趋势. 乌伦古湖从 20 世纪 50 年代到 80 年代末, 矿化度一直在较高水平. 1988 年由于“引额济海”渠的开通, 增加了乌伦古湖的入水量, 十多年来其水质矿化度较 1988 年降低了 1 g/L^[27], 近年来也呈现出逐渐增大的趋势. 乌梁素海作为河套灌区水利工程的重要组成部分, 直接纳入后套黄河灌区农业灌溉退水, 湖水水位年波动较大, 导致矿化度也呈波动变化. 吉力湖从 20 世纪 50 年代至今, 矿化度一直呈增加趋势, 且近年来急速增大. 总的看来, 2002 年以来, 各湖泊水体矿化度均呈现出逐渐增大的趋势. 这与人类活动的影响密切相关, 博斯腾湖和乌梁素海矿化度受流域内高矿化度农田排水和工矿企业污水的污染^[3, 26]. 大量农田排水使河道水质恶化, 盐分向湖泊迁移, 是乌伦古湖矿化度升高的主要原因之一^[27]. 由于乌伦古湖已经断流, 导致吉力湖湖水矿化度快速升高. 因此, 人类活动是近年来蒙新地区这类湖泊水质逐渐恶化的主要原因. 为了今后蒙新地区实现社会经济的可持续发展, 必须高度重视蒙新地区湖泊的水污染和水资源保护问题.

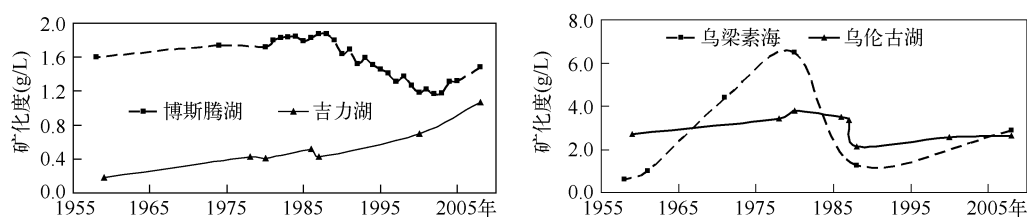


图 5 近 50 年来蒙新高原湖泊矿化度变化

Fig. 5 The TDS variation of water samples of the lakes in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau in recent fifty years

4 参考文献

- [1] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 317-366.
- [2] 张振克, 杨达源. 中国西北干旱区湖泊水资源——环境问题与对策. 干旱区资源与环境, 2001, 15(2): 7-10.
- [3] 史小红, 李畅游, 贾克力. 乌梁素海污染现状及驱动因子分析. 环境科学与技术, 2007, 30(4): 37-39.
- [4] 韩瑞梅, 姚亦淳, 韩瑞清. 哈素海富营养化及防治对策. 内蒙古农牧学院学报, 1995, 16(2): 78-82.
- [5] 李新贤, 党新成, 李红等. 新疆主要湖泊、水库的水质综合特征评价模式及营养状态分析. 干旱区地理, 2005, 28(5): 588-591.
- [6] 李元寿, 贾晓红, 鲁文元. 西北干旱区水资源利用中的生态环境问题及对策. 水土保持研究, 2006, 13(1): 217-220.
- [7] 王根绪, 程国栋, 徐中民. 中国西北干旱区水资源利用及其生态环境问题. 自然资源学报, 1999, 14(2): 110-116.
- [8] Evans CD, Monteith DT, Cooper DM. Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: observations, possible causes and environmental impacts. Environmental Pollution, 2005, 137: 55-71.
- [9] 赵景峰, 秦大河, 长岛秀树等. 博斯腾湖的咸化机理及湖水矿化度稳定性分析. 水科学进展, 2007, 18(4): 475-482.
- [10] 马丽娟, 赵景峰, 张宏俊等. 气候变化背景下冰川积雪融水对博斯腾湖水位变化的影响. 干旱区地理, 2010, 33(2): 210-216.
- [11] 左其亭, 马军霞, 陈曦. 博斯腾湖水体矿化度变化趋势及调控研究. 水科学进展, 2004, 15(3): 307-311.
- [12] Murdoch PS, Baron JS, Miller TL. Potential effects of climate change on surface-water quality in North America. Journal of the American Water Resources Association, 2000, 36: 347-366.

- [13] 谢立新. 乌伦古湖泊水位及水质变化原因分析. 水资源与水工程学报, 2009, **20**(2): 149-151.
- [14] 曹建廷, 王苏民, 沈吉等. 近40年来内蒙古岱海水位下降的主要原因. 干旱区研究, 2009, **19**(1): 1-6.
- [15] 秦伯强. 近百年来亚洲内陆湖泊演变及其原因分析. 湖泊科学, 1999, **11**(1): 11-19.
- [16] 胡安焱. 流域气候变化和人类活动对内陆湖泊影响的分析. 干旱区资源与环境, 2007, **21**(5): 1-5.
- [17] 高华中, 贾玉连. 西北典型内陆湖泊近40年来的演化特点及机制分析. 干旱区资源与环境, 2005, **19**(5): 93-96.
- [18] 施雅风, 沈永平, 李栋梁等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. 第四纪研究, 2003, **23**(2): 152-164.
- [19] 马道典, 张莉萍, 王前进等. 暖湿气候对赛里木湖的影响. 冰川冻土, 2003, **23**(2): 219-223.
- [20] 尹立河, 张茂省, 董佳秋. 基于遥感的毛乌素沙地红碱淖面积变化趋势及其影响因素分析. 地质通报, 2008, **27**(8): 1151-1156.
- [21] 肖霞云, 羊向东, 沈吉等. 陕西红碱淖近百年来来的孢粉记录及环境变化. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 28-34.
- [22] 施雅风, 曲耀光. 柴窝堡-达坂城地区水资源与环境. 北京: 科学出版社, 1989: 1-135.
- [23] 柴政, 玉米提·哈力克, 苟新华等. 新疆柴窝堡水源地地下水超采引发的环境问题. 水土保持研究, 2008, **15**(5): 132-135.
- [24] 马龙, 吴敬禄. 30多年来干旱区柴窝堡湖演化特征及其环境效应. 干旱区地理, 2010, 待刊.
- [25] 张建平, 胡随喜. 博斯腾湖矿化度现状分析. 干旱环境监测, 2008, **22**(1): 19-24.
- [26] 徐海量, 陈亚宁, 李卫红. 博斯腾湖湖水污染现状分析. 干旱区资源与环境, 2003, **17**(3): 95-97.
- [27] 李立人, 王雪冬. 乌伦古湖水水质现状及污染防治对策. 干旱环境监测, 2003, **17**(2): 102-106.