

典型草原露天煤矿区地下水—湖泊系统演化*

夏蔓宏¹, 董少刚^{1**}, 刘白薇², 李 轶¹, 李政葵¹, 王 超¹, 周雨泽¹

(1: 内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010021)

(2: 内蒙古大学社会科学处, 呼和浩特 010021)

摘 要: 由于气候干旱、大量疏排地下水导致草原露天煤矿区普遍存在着水文循环失调、土壤沙化、草地退化等环境地质问题。本研究以呼伦贝尔草原伊敏露天煤矿为研究对象, 在对矿区地下水—湖泊系统调查分析的基础上, 结合水文、气象及遥感影像等数据, 应用水均衡原理构建矿区地下水位—湖泊面积响应机制的数学模型, 并利用此模型预测分析矿区开发对伊敏盆地内湖泊面积的影响。结果表明: 煤矿开采 35 年来, 伊敏盆地湖群数量由开采前 (1982 年) 的 5 个变为如今 (2017 年) 的 2 个, 湖泊总面积由原来的 6.94 km² 萎缩到 1.12 km²; 矿区地下水—湖泊关系由自然状态下的地下水补给湖泊型向湖泊补给地下水型演化; 本文建立的地下水—湖泊耦合数学模型可较好地对湖泊面积进行预测, 在气候因素波动不大、矿山开发稳定的状况下, 该矿闭矿时 (2045 年) 研究区湖泊面积将萎缩至 0.56 km²。

关键词: 露天煤矿; 地下水; 湖泊面积; 地下水—湖泊耦合模型

Evolution of groundwater–lake system in typical open-pit coal mine area *

XIA Manhong¹, DONG Shaogang^{1**}, LIU Baiwei², LI Yi¹, LI Zhengkui¹, WANG Chao¹ & ZHOU Yuze¹

(1: *College of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, P.R.China*)

(2: *Social Science Division, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, P.R.China*)

Abstract: Due to the climatic drought and a large amount of groundwater drainage, environmental geological problems such as hydrological circulation disorders, soil desertification and grassland degradation are common in open-pit coal mining areas. This study takes the Yimin open-pit coal mine area in Hulun Buir Grassland as the research object. Based on the investigation and analysis of the groundwater–lake system, this study combines hydrological, meteorological and remote sensing image data to construct the mathematics of the groundwater–lake response mechanism in the mining area. The model is used to predict and analyze the impact of mine development on lake in the area. The results show that the number of the group of lakes has changed from 5 to 2, and the total area of lakes has shrunk from 6.94 km² to 1.12 km² in the past 35 years of coal mining. The groundwater–lake interaction in the mining area has evolved from the type of natural groundwater recharge lake to the one of lake recharge groundwater. Based on the principle of water balance, the mathematical model of the groundwater–lake response mechanism in the mining area is established. Based on the analysis of the coupled mathematical model of groundwater and lake, it is found that under the condition of limited fluctuations of climatic factors and stable development of the mine, the largest chedaminor lake in the study area will shrink to 0.56 km² when the mine would be closed (in the year of 2045).

Keywords: Coal mining; groundwater; lake area; groundwater–lake coupling model

强烈人工干预下的地下水流动系统变化, 已经成为影响局部乃至区域生态水文平衡的主要驱动力^[1]。干旱—半干旱地区的煤炭资源开发往往会改变区域地下水循环模式, 破坏地下水与湖泊、河流等地表水体之间的水力联系^[2-5], 而湖泊对维持生态平衡、保护区域栖息物种等具有重要意义^[6-11]。国内外学者们对于煤碳

* 2019-05-10 收稿; 2019-06-22 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (41562020, 41702251, 41002129)、内蒙古自治区自然科学基金项目 (2018MS04004) 和内蒙古大学生科研创新项目 (10000-15010109) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: groundwater@163.com.

资源开采对湖泊的影响进行了大量研究. 赵宁等和杨立彬等^[12-13]研究发现鄂尔多斯盆地的风沙区依赖地下水补给的湖泊多达 500 个, 由于建坝、打井抽取地下水和煤炭资源开采等人为因素的影响, 引发区域地下水位大幅下降、部分湖泊湿地变干, 如中国第一大沙漠湖泊—红碱淖的水域面积减少了 26.66 km²; 王文科等^[14]研究发现荒漠化地带的陕北矿区内河流及湖泊 40%~70% 的流量来自地下水的补给, 而在大规模煤矿山开发过程中, 地下水普遍下降 10~12 m, 导致区域河水流量及湖泊水面大幅减少; 马雄德等^[15]研究发现, 在 1990—2011 年期间, 沙漠滩地的陕西榆神府矿区内水体总体呈现减少的趋势, 境内水体面积从 162.63 km² 降低到 103.84 km²; Pöschke 等^[16]对斯坦克林湖的研究中发现只有一部分集水区的地下水补给湖泊, 而其余的则向更深的含水层泄漏; Rudnick 等^[17]研究发现湖泊的地下水排放可以在湖泊的水平衡中发挥主要作用; Hajati 等^[18]对汉普顿湖的研究中发现在低于平均降水量的情况下, 该湖经历了一次倒流, 在此期间该湖主要转变为补给湖, 然后于 2012 年初返回一个过流湖.

综上所述, 学者们对于湖泊与地下水之间的演化关系进行了一定的研究, 但定量^[16, 19-20]评价地下水对湖泊的补给作用是很困难的, 现有研究主要集中于定性描述煤矿开采引起的地下水位变化对湖泊水量的影响, 有鉴于此, 本研究以内蒙古呼伦贝尔草原伊敏露天煤矿为研究对象, 在对区域地下水系统调查的基础上, 利用遥感技术、地下水系统理论及水均衡原理, 探讨煤矿开采活动对地下水—湖泊系统的演变影响, 构建地下水位与湖泊面积之间的关系模型, 定量揭示采矿引起的地下水位变化对湖泊面积(水量)的影响.

1 研究区概况

1.1 地理地貌

研究区位于大兴安岭西坡, 伊敏盆地南部, 伊敏河中下游地区, 隶属于内蒙古自治区呼伦贝尔市鄂温克自治旗, 面积约 100 km². 伊敏煤田地貌呈一半封闭型的盆地, 东西两侧为丘陵, 南部为台地, 盆地内为冲积平原, 海拔在 651~673 m, 南高北低, 东西两侧稍高, 中心低洼^[10](图 1).

1.2 气象水文

研究区属于典型的中温带大陆性季风气候, 四季分明, 冬冷夏凉. 年均气温 -1.9℃, 境内降水自东南向西北递减, 多年年均降水量为 354.73 mm, 年均蒸发量为 1318.3 mm.

区内最主要的河流为伊敏河, 苇子坑河等其余河流均为其支流, 伊敏河由南向北从盆地东部穿过, 全长 2000 km, 流域面积可达 9000 km², 河床宽约 60 m, 水深 0.50~2.50 m. 目前伊敏露天煤矿区内地下水补给主要依赖于大气降水、伊敏河以及盆地内零星分布的湖泊. 天然状况下, 伊敏河水与地下水的关系为丰水季节伊敏河水补给地下水, 枯水季节地下水补给河水. 在煤矿开采的影响下, 伊敏河受影响河段与地下水的关系是伊敏河水补给地下水. 由于伊敏矿区疏排地下水, 改变了区域地下水循环特征. 目前地下水排泄方式主要是向露天矿疏干区排泄. 地表水则以径流的方式, 汇集于盆地低洼处, 或渗透于地层中或以蒸发的形式排泄^[21].

2 数据来源与处理方法

遥感影像采用 Landsat MSS、TM 和 OLI 数据(表 1); 水文地质资料来源于黑龙江省伊敏煤田精查报告、伊敏煤矿水文地质调查报告、伊敏煤矿矿区地下水位动态监测报告及课题组 2016—2018 年的实地调查; 气象数据来源于当地气象局.

表 1 研究采用的 Landsat 影像数据集
Tab.1 Landsat images used in the research area

日期	轨道号	平台与传感器	分辨率/m
1982 年 6 月 1 日	126/32	Landsat MSS	60
2000 年 8 月 5 日	126/32	Landsat5 TM	30
2012 年 8 月 21 日	126/32	Landsat7 TM	30
2017 年 6 月 24 日	126/32	Landsat8 OLI	30

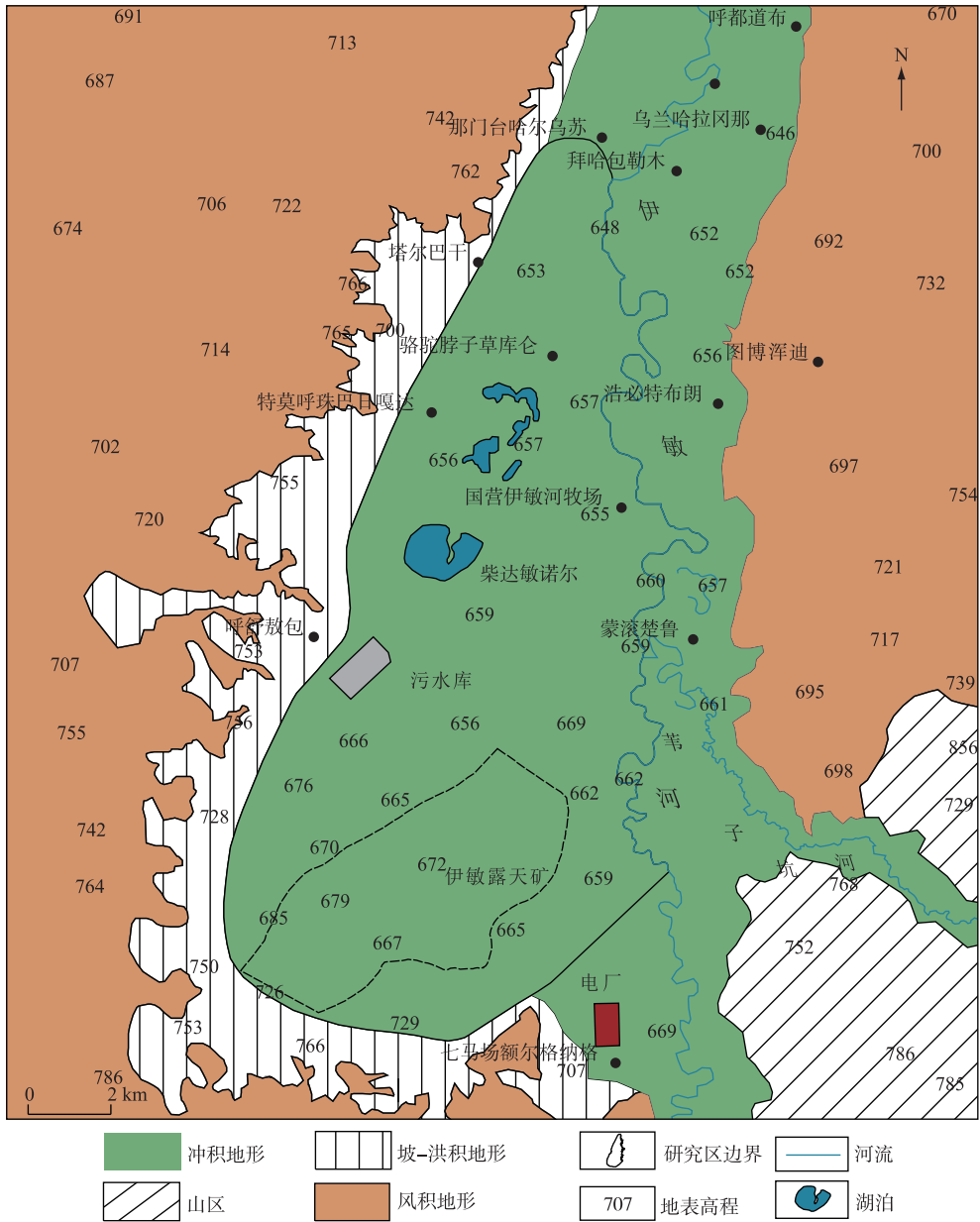


图 1 研究区地理地貌

Fig.1 Geographical and topographic map of the research area

水体指数法是实现水体快速提取的简单便捷方法之一^[22]. 伊敏盆地的湖泊数量较多,大小不一,故采用水体指数法并结合目视解译的方式进行提取. 本文利用在 ENVI5.1+IDL 平台开发出的归一化水体指数 (Normal difference water index, NDWI) 从上述 4 期 Landsat 系列遥感数据中提取伊敏盆地水体信息并绘制湖泊水体图, 然后结合实地调查和收集的数据, 分析煤矿开采 35 年来地下水-湖泊系统的演化规律.

3 区域地下水-湖泊关系模型

3.1 湖泊水均衡方程

湖水的补给包括降雨、可能的地表径流及地下水补给,湖泊的排泄主要是蒸发、可能的地表径流排泄以及工农业用水. 因此,一般湖泊的水均衡方程为:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = A(t)P(t) + f(t) - A(t)E(t) - Q(t) - W_q(t) \quad (1)$$

式中, V 为湖泊的湖水体积, m^3 ; $\partial V/\partial t$ 为单位时间内的湖泊水体体积变化率, m^3/a ; A 为 t 年份的湖泊水面面积, m^2 ; P 为 t 年份的年降水量, m ; $f(t)$ 为产汇流函数; E 为 t 年份的年蒸发量, m ; Q 为 t 年份的湖泊人工抽取水量及地表径流排泄量, m^3/a ; W_q 为单位时间内地下水与湖泊的交换量, m^3/a .

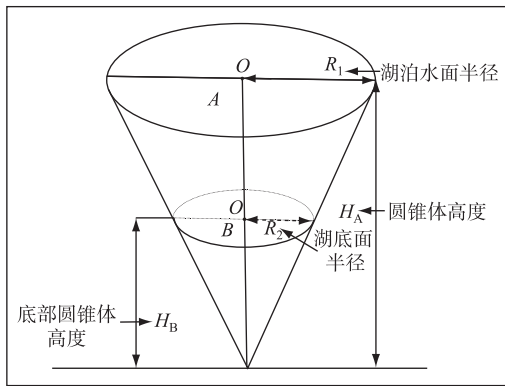


图 2 湖泊水体体积示意图
Fig.2 Diagram of lake water volume

3.2 草原圆台型湖泊面积与地下水位关系方程

前人研究表明直接测量地下水与湖泊的交换量不仅耗时、耗力还容易出错^[23],本次研究利用水均衡原理、达西定律及几何学知识建立地下水位-湖泊面积之间的关系方程. 由于研究区湖泊四周地势平坦,形态大多近似圆台体,故以圆台体湖泊类型为例,湖泊水体体积示意图如图 2.

湖泊水体体积可表示为:

$$V = \frac{1}{3}(\pi \cdot r \cdot R_1^2 \cdot H_A - \pi \cdot R_2^2 \cdot H_B) = \frac{1}{3}(A \cdot H_A - B \cdot H_B) \quad (2)$$

则 H_A 为:

$$H_A = \frac{H_B}{\sqrt{B/A}} \quad (3)$$

式中, V 为湖泊水体体积, m^3 ; R_1 为湖泊水面半径, m ; A 为湖泊水面面积, m^2 ; R_2 为湖底面半径, m ; H_A 为圆锥体高度, m ; B 为湖底面积, m^2 ; H_B 为湖底圆锥体的高, m . H_B 和 B 为定值,则知道了 A 就可以求出 H_A ,反之亦然.

由于圆台体湖泊类型一般为图 2 所示,故以湖泊水面和湖底所构成的圆锥体顶部为 $(0,0)$,垂直于湖泊水面的方向为纵坐标,平行于湖泊水面的方向为横坐标建立直角坐标系(图 3),则单位时间内地下水与湖泊的交换量为:

$$W_q(t) = \frac{H_A(t) - H(t)}{M} K \cdot A(t) \quad (4)$$

式中, H 为 t 年份湖泊周围地下水位平均高程, m ; M 为湖底淤泥层平均厚度, m ; H_A 为 t 年份的湖泊水位高程(即等于圆锥体高度), m ; K 为湖泊淤泥层垂向渗透系数, m/d .

把公式(4)代入公式(1)得到如下方程:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = A(t)P(t) + f(t) - A(t)E(t) - Q(t) - \frac{H_A(t) - H(t)}{M} K \cdot A(t) \quad (5)$$

把公式(2)和公式(3)代入公式(5)得如下方程:

$$\frac{A(t + \Delta t) - A(t)}{\Delta t} = \frac{2\sqrt{A(t)B}[P(t) - E(t)]}{H_B} + 2\frac{\sqrt{B}}{H_B\sqrt{A(t)}}[f(t) - Q(t)] - \frac{2K[A(t)H_B - \sqrt{A(t)B}H(t)]}{H_B \cdot M} \quad (6)$$

公式(6)提供了一种利用地下水位变化求解湖泊面积的方法.

研究区的湖泊均属于封闭型湖泊,主要由降水和地下水补给,无地表径流出入,排泄方式以蒸发和渗漏为主. 根据实地调查资料可知,湖泊周围为牧区,无工农业用水,湖泊均为咸水湖不适合牲畜饮用,因此公式(6)可简化为:

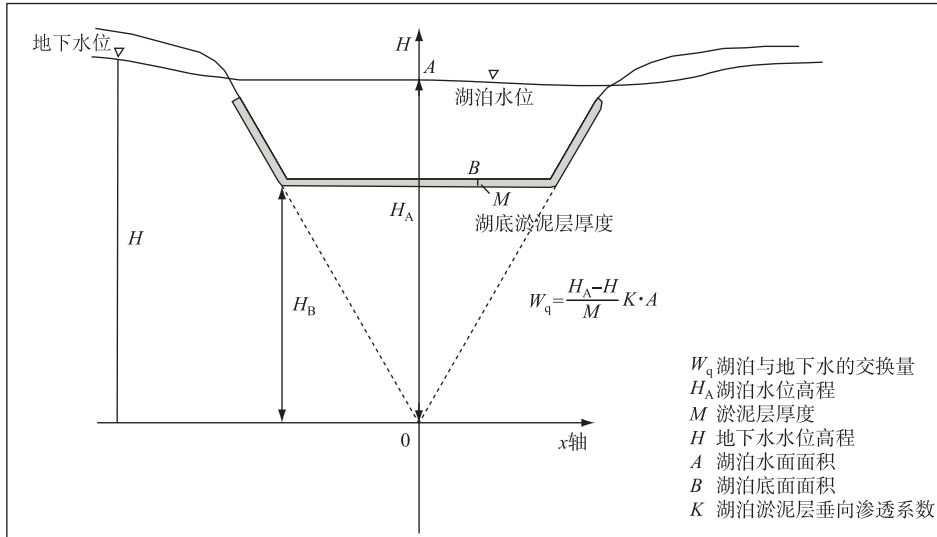


图3 地下水-湖泊交互关系概念示意图

Fig.3 Schematic diagram of groundwater-lake interaction

$$\frac{A(t + \Delta t) - A(t)}{\Delta t} = \frac{2\sqrt{A(t)B}[P(t) - E(t)]}{H_B} - K \frac{2[A(t)H_B - \sqrt{A(t)B}H(t)]}{H_B \cdot M} \quad (7)$$

根据湖泊水位与地下水位高程的关系,将研究区的地下水-湖泊系统分为地下水位高于湖泊水位,地下水补给湖泊;地下水位低于湖泊水位,高于湖泊底部淤泥质底板高程,湖泊补给地下水且补给量与地下水位有关;地下水位低于湖泊底部淤泥质隔水层底板高程,湖泊补给地下水但补给量与地下水位无关3种类型,对应的关系方程为:

$$\frac{A(t + \Delta t) - A(t)}{\Delta t} = \begin{cases} \frac{2\sqrt{A(t)B}(P(t) - E(t))}{H_B} + K \frac{2[A(t)H_B - \sqrt{A(t)B}H(t)]}{H_B \cdot M}, & H(t) > H_A \\ \frac{2\sqrt{A(t)B}(P(t) - E(t))}{H_B} - K \frac{2[A(t)H_B - \sqrt{A(t)B}H(t)]}{H_B \cdot M}, & H_B < H(t) \leq H_A \\ \frac{2\sqrt{A(t)B}(P(t) - E(t))}{H_B} - \frac{2[A(t)H_B K - \sqrt{A(t)B}KM]}{H_B \cdot M}, & H(t) < H_B \end{cases} \quad (8)$$

公式(8)基本涵盖了草原圆台型湖泊面积与地下水位的响应关系.只要知道湖泊底面积(\$B\$)、某一时刻的湖水面积(\$A\$)、水深等初始条件后,根据测得的蒸发、降雨、地下水等常观资料,就可以求出任何时刻的湖泊面积.

4 结果

4.1 矿区地下水场变化

伊敏露天煤矿于1983年开始投产,目前年产原煤2300万t,预计2045年闭矿^[24].根据历史地下水观测孔实测的地下水位数据,采用GIS中的克里金插值法得到1982、2000、2012、2017年8月份的地下水等水位线(图4).由图4可知,煤矿开采前研究区内的地下水位在660~674m之间,波动范围较小,除靠近丘陵的部分西南区域外,研究区地下水位仅相差5m左右,湖泊周围地下水位最浅,在0~2m之间.2000年以后,研究区南部以采坑为中心的地下水位出现大幅下降,地下水位降落111m,而北部地区的地下水位变化并不大,这与冯海波等的研究结果一致^[21].从2012年开始,采坑周围不再有潜水,相较2000年,研究区北部的地下水位基本无变化;2012—2017年,研究区的地下水位趋于稳定,不再有大范围的波动.

这是因为煤矿开采前(即1982年)伊敏盆地地下水水流场分布主要由地形地貌、地质构造等决定,地下水流向伊加诺尔、巴嘎诺尔湖群为研究区南部局部的地下水排泄区,区域地下水总体由南部和西部台地丘陵向伊敏河排泄. 煤矿开采后,受露天采坑和疏干水的影响,地下水位的波动幅度较为剧烈,区域地下水流系统的补径排特征发生明显改变.

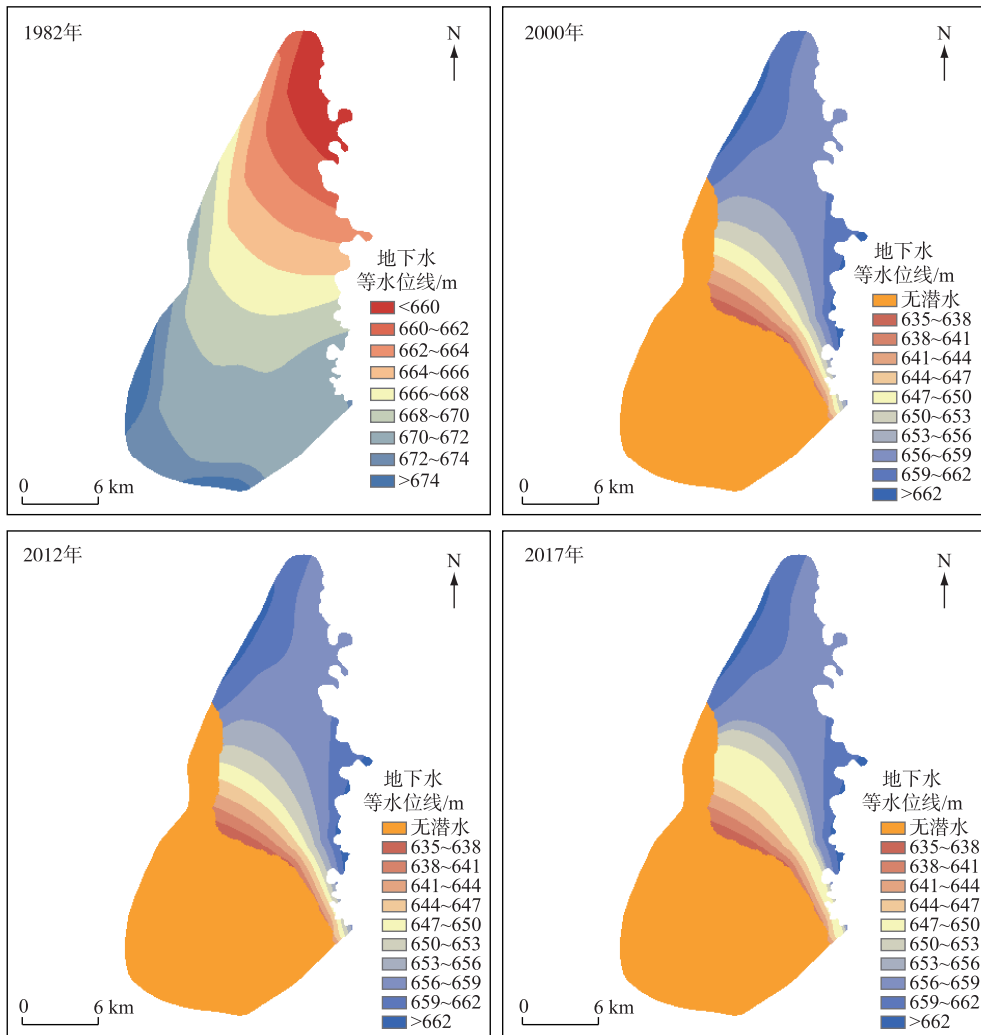


图4 1982—2017年伊敏矿区地下水等水位线变化

Fig.4 Changes of groundwater levels in the Yimin mining area from 1982 to 2017

4.2 矿区湖泊面积变化

随着开采年限的延长,湖群数量及面积在不断发生变化(表2、图5). 煤矿开发前(1982年),研究区有骆驼脖子草库伦、柴达敏诺尔、哈尔呼吉诺尔、哈沙廷布拉格、伊加诺尔和巴嘎诺尔5处湖群,自2000年开始,研究区内的湖群只有骆驼脖子草库伦和柴达敏诺尔两处,其水域面积也在不断变小. 截止到2017年,湖泊总面积由采矿前的 6.94 km^2 缩小为 1.12 km^2 ,面积减少率达84%. 其中,目前最大的柴达敏诺尔湖泊面积仅存有 0.97 km^2 . 伊敏煤矿开采35年来,研究区湖泊水面面积一直呈持续萎缩趋势.

本研究区湖泊属于封闭型内流湖,主要接受大气降水和地下水的补给,无地表径流出入,排泄量较少,因此煤矿开采前的湖泊数量多且面积较稳定. 然而,露天矿区开发的影响下,研究区南部的伊加诺尔和巴嘎

诺尔两个湖群已经被露天采坑所取代,并随着采矿规模和开采年限的不断增大,研究区以北的骆驼脖子草库伦和柴达敏诺尔湖群也出现逐年减少的趋势。

表 2 1982—2017 年伊敏矿区湖泊面积
Tab.2 Lake area of Yimin mining area from 1982 to 2017

时间	湖泊面积/km ²					
	总面积	骆驼脖子草库伦	柴达敏诺尔	哈尔呼吉诺尔	哈沙廷布拉格	伊加诺尔巴嘎诺尔
1982 年	6.94	0.55	2.36	0.19	0.24	3.60
2000 年	2.42	0.42	2.00	0	0	0
2012 年	2.10	0.35	1.84	0	0	0
2017 年	1.12	0.15	0.97	0	0	0

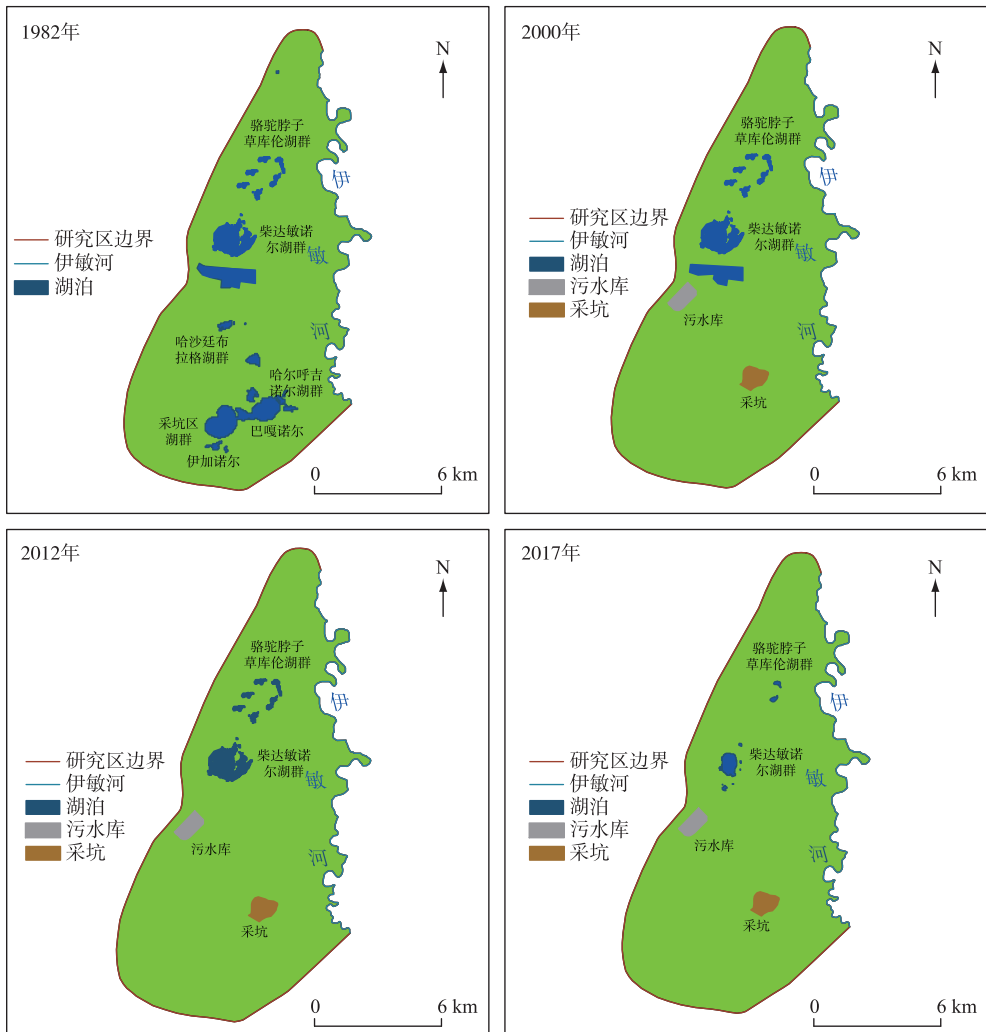


图 5 1982—2017 年伊敏矿区湖泊示意图

Fig.5 Schematic diagrams of the lakes in Yimin mining area from 1982 to 2017

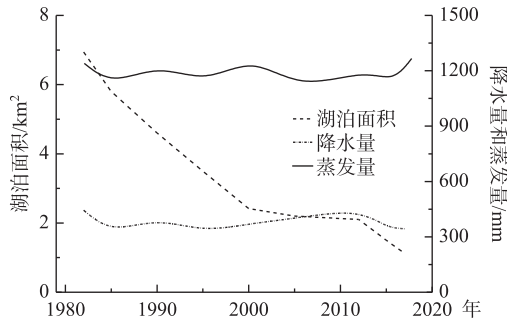


图 6 气象因素(降水量和蒸发量)与湖泊面积变化
Fig.6 Changes of meteorological factors and lake area

5 讨论

5.1 区域地下水-湖泊补排关系演化

人类活动(如抽水)、气象、地下水等因素均可能导致区域湖泊面积(水量)发生变化. 研究区地处草原,区内湖泊均属于咸水湖,目前没有人工利用的途径. 根据气象资料,1982—2017年间该区降水和蒸发量波动都比较平稳,而区内湖泊面积总体却呈显著下降趋势(图6). 因而,煤矿开采导致的地下水位变化可能是引起区内湖泊面积(水量)发生萎缩的最主要原因.

伊敏露天煤矿开采前,矿区地下水位高于湖泊水位,区内5个湖群均依赖地下水补给,属于地下水补给型湖泊(图7a). 1982年以后,受矿山开发强烈抽排地下水的干扰,使地下水位持续下降,进而导致地下水对湖泊的补给逐渐减少,部分湖泊水体开始透过湖底淤泥质弱透水层补给地下水,水面面积不断萎缩. 目前哈尔呼吉诺尔、哈沙廷布拉格等湖群正由地下水补给湖泊型向湖泊补给地下水型过渡. 在这期间,由于地下水位的不断下降,且湖泊底部淤泥质弱透水层的阻滞作用,地下水补给湖泊越来越困难(图7b). 最终,地下水下降至湖泊底部淤泥层以下,地下水不再补给湖泊,而湖泊却处于渗漏补给地下水状态,导致湖泊面积不断萎缩甚至消失(图7c). 由此可见,地下水是影响区内地下水-湖泊演变的关键因素.

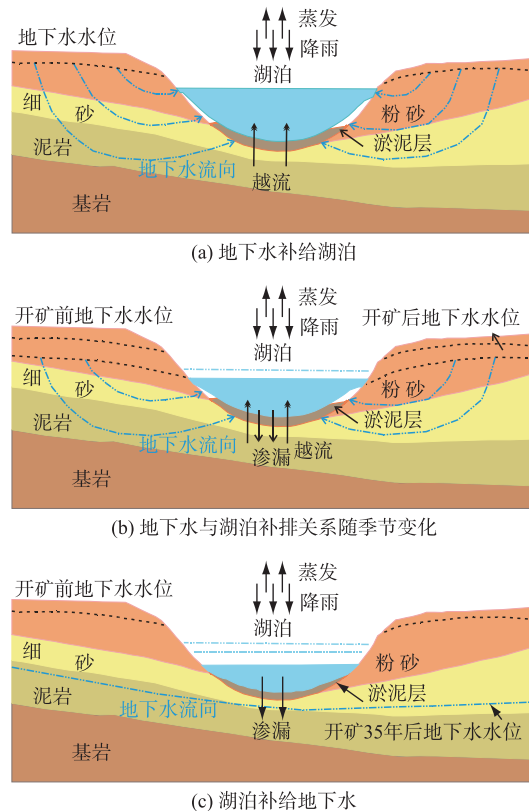


图 7 矿区地下水-湖泊补给类型演化

Fig.7 Evolution of groundwater-lake recharge type in mining area

5.2 矿区湖泊面积变化预测分析

为了进一步分析矿区开发对未来湖泊面积的影响,利用构建的地下水-湖泊关系方程,结合实地调查及搜集的资料(表3)预测了矿区湖泊总面积未来的演化趋势.本文选取表3给出的相关数据检验模型的可靠性,由于在2000年以后,矿区只有以柴达敏诺尔湖泊骆驼脖子草库伦湖为首的两处湖群,因此,本文选取柴达敏诺尔(图8a)和骆驼脖子草库伦湖泊的实测面积和模型计算面积进行检验(图8b),从图上看计算值与实测值基本吻合,其拟合优度均达到了0.8以上.并且随着地下水流场趋于稳定,地下水与湖泊之间的补排关系发生改变由地下水补给湖泊转变为湖泊补给地下水,因此模型后期不再考虑地下水这一变量,最终使得模型的拟合程度呈现出随时间变化不断增强的趋势.该模型能够应用于预测圆台型湖泊面积受地下水水位的影响变化情况.另外,从图4可以看出,2012年以后,地下水位的波动幅度很小,在假设未来地下水水位稳定、气候因素波动不大、矿山开采正常运行的情况下,利用该模型可以预测出2045年(闭矿时)研究区湖泊总面积为0.56 km².

表3 地下水-湖泊解析模型参数取值
Tab.3 Groundwater-lake analytical model parameters

参数	1982年	1990年	2000年	2012年	2017年	备注
柴达敏诺尔湖底圆锥体高度 H_B/m	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	查阅研究区相关水文资料获得
骆驼脖子草库伦湖底圆锥体高度 H_B/m	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	同上
柴达敏诺尔湖底面积 $B/(\times 10^6 m^2)$	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	同上
骆驼脖子草库伦湖底面积 $B/(\times 10^6 m^2)$	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	同上
柴达敏诺尔湖泊水面积 $A/(\times 10^6 m^2)$	2.36	2.24	2.00	1.84	0.97	取自遥感解译值
骆驼脖子草库伦湖泊水面积 $A/(\times 10^6 m^2)$	0.55	0.42	0.37	0.29	0.15	同上
年降水量 P/m	0.44	0.40	0.38	0.37	0.34	取自当地气象局
年蒸发量 E/m	1.25	1.21	1.24	1.29	1.27	同上
柴达敏诺尔湖泊水位高程 H_A/m	1.73	1.64	1.46	1.34	0.71	公式(3)计算所得
骆驼脖子草库伦湖泊水位高程 H_A/m	2.86	2.18	1.92	1.51	0.78	同上
柴达敏诺尔湖淤泥层平均厚度 M/m	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	取自水文地质勘查资料
骆驼脖子草库伦湖淤泥层平均厚度 M/m	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	同上
柴达敏诺尔湖淤泥层垂向渗透系数 $K/(\times 10^{-3} m/d)$	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	同上
骆驼脖子草库伦湖淤泥层垂向渗透系数 $K/(\times 10^{-3} m/d)$	5.24	5.24	5.24	5.24	5.24	同上
柴达敏诺尔湖地下水水位高程 H/m	2.45	2.14	1.85	1.26	0.67	取自钻孔及实测值
骆驼脖子草库伦地地下水水位高程 H/m	3.32	2.86	2.45	2.00	0.70	同上

本研究中构建的为圆台型草原湖泊-地下水交互关系解析模型,在自然界中除了圆台型湖泊外,还存在诸如矩形、椭圆形及其他不规则几何体的湖泊类型.虽然它们形状及水文地质条件不同,但湖泊与地下水之间的相互作用机制是一样的.只要根据湖泊的几何形状进行合理的概化,并能够应用数学公式对其进行描述,则根据水均衡原理、达西定律、几何学知识,湖泊面积和地下水水位的关系模型就能够建立起来.通过调查掌握了某时刻的湖泊面积、湖泊水深、地下水水位高程等初始条件,便可在预设气象、水文、人工开采等因素后,利用模型预测未来任意时刻的湖泊水面面积.该模型计算准确度除了与掌握的气象、水文、水文地质等资料的精度有关外,还与时间步长有关.理论上,在迭代计算过程中, Δt 取值越小,则方程计算精度越高,在实际应用中,应根据需要选取合适的时间步长.该类地下水-湖泊面积解析模型,参数简单且容易获取,计算方便,实用范围较广.

6 结论

本文分析了伊敏煤矿开采35年来区域地下水系统演化特征,通过建立地下水水位与湖泊面积关系模型

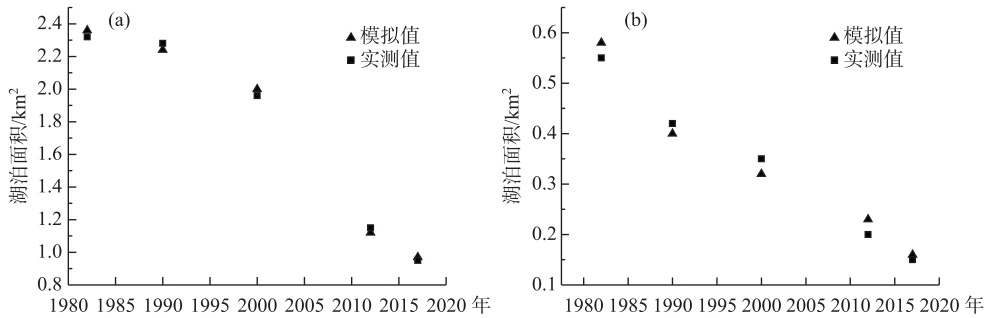


图 8 1982—2017 年间柴达敏诺尔湖泊 (a) 和骆驼脖子草库伦湖泊 (b) 面积变化

Fig.8 Changes in area of Lake Chedamenor (a) and Lake Luotuoboziyaokulun (b) from 1982 to 2017

定量揭示了煤矿开采引发的地下水位变化对湖泊面积的影响. 主要结论如下:

1) 煤矿开采前研究区有 5 处湖泊群, 开采至 2000 年时只存有柴达敏诺尔和骆驼脖子草库伦两处湖泊群, 其他皆消失; 截至 2017 年, 湖泊总面积由采矿前的 6.94 km^2 萎缩到 1.12 km^2 , 减少率达 84%. 伊敏煤矿开采 35 年来, 研究区湖泊数量及水体面积呈持续萎缩趋势.

2) 煤矿开采前, 矿区地下水位高于湖泊水位, 区内 5 个湖群均依赖地下水补给, 属于地下水补给型湖泊; 随着煤矿开采年限的增长及采矿规模的不断扩大, 矿区地下水位下降至湖泊底部淤泥层以下地下水将不再补给湖泊, 湖泊水面面积持续萎缩甚至消失; 矿区地下水—湖泊补给类型总体上由地下水补给湖泊型向湖泊补给地下水型演化.

3) 基于水均衡原理构建了草原湖泊—地下水耦合模型, 经检验拟合优度均达到了 0.80 以上, 该模型能够应用于预测圆台型湖泊面积随地下水位变化情况. 在气候因素波动不大, 煤矿开发稳定的情况下, 利用该模型预测发现, 伊敏煤矿闭矿时 (2045 年) 矿区湖泊总面积将萎缩至 0.56 km^2 .

致谢: 感谢中国地质大学 (武汉) 王全荣教授对文中构建湖泊面积与地下水位关系模型的指导.

7 参考文献

- [1] Dong SG, Jia ZB, Liu BW *et al.* Study on eco-hydrogeological evolution in underground mining coal of arid areas: Taking the coal mine in Ordos as the example. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2013, **41**(2): 45-48. [董少刚, 贾志斌, 刘白薇等. 干旱区井工开采煤矿山生态水文地质演化研究——以鄂尔多斯某煤矿为例. 工程勘察, 2013, **41**(2): 45-48.]
- [2] Davis A, Heatwole K, Greer B *et al.* Discriminating between background and mine-impacted groundwater at the Phoenix mine, Nevada USA. *Applied Geochemistry*, 2010, **25**(3): 400-417.
- [3] Sasamoto H, Yui M, Arthur RC. Hydrochemical characteristics and groundwater evolution modeling in sedimentary rocks of the Tono mine, Japan. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2004, **29**(1): 43-54.
- [4] Wang QM, Zhao M. Effects of coal resources' exploitation on the water resource and vegetation in arid and semi-arid region. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2017, **28**(3): 77-81. [王强民, 赵明. 干旱半干旱区煤炭资源开采对水资源及植被生态影响综述. 水资源与水工程学报, 2017, **28**(3): 77-81.]
- [5] Zhang XL, Guan TY, Zhou JH *et al.* Groundwater depth and soil properties are associated with variation in vegetation of a desert riparian ecosystem in an arid area of China. *Forests*, 2018, **9**(1): 34-51.
- [6] Zhu CM, Li JL, Zhang X *et al.* Bosten water resource dynamic detection and feature analysis in recent 40 years by remote sensing. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(1): 106-114. [朱长明, 李均力, 张新等. 近 40a 来博斯腾湖水资源遥感动态监测与特征分析. 自然资源学报, 2015, **30**(1): 106-114.]
- [7] Terry JA, Sadeghian A, Baulch HM *et al.* Challenges of modelling water quality in a shallow prairie lake with seasonal ice cover. *Ecological Modelling*, 2018, **384**: 43-52.
- [8] Liu JG. Recharge mechanisms of lakes and groundwater in Badain Jaran Desert. *Water Resources Protection*, 2010, **26**(2):

- 18-23. [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] Zhao JB, Ma YD, Luo XQ *et al.* The discovery of surface runoff in the megadunes of Badain Jaran Desert, China, and its significance. *Science China: Earth Sciences*, 2017, **47**(4): 461-472. [赵景波, 马延东, 罗小庆等. 巴丹吉林沙漠沙山表层径流的发现及其指示意义. 中国科学: 地球科学, 2017, **47**(4): 461-472.]
- [10] Liu XB. Study on groundwater and soil environmental response in opencast coal mine area—Hulun Buir Grassland Yimin Coal Mine as a case study [Dissertation]. Hohhot: Inner Mongolia university, 2018. [刘晓波. 露天煤矿区地下水与土壤环境响应研究——以呼伦贝尔草原伊敏煤矿为例[学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2018.]
- [11] Wang W, Yang Z, Kong J *et al.* Ecological impacts induced by groundwater and their thresholds in the arid areas in North-west China. *Environmental Engineering & Management Journal*, 2013, **12**(7): 1497-1507.
- [12] Zhao N, Ma C, Yang YL. Water quality variation of Lake Hongjiannao and its driving force analysis from 1973 to 2013. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 982-993. DOI: 10.18307/2016.0507. [赵宁, 马超, 杨亚莉. 1973—2013年红碱淖水域水质变化及驱动力分析. 湖泊科学, 2016, **28**(5): 982-993.]
- [13] Yang LB, Huang Q, Wu J *et al.* Influence factors and prediction on area change of lake Hongjiannao. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 2014, **28**(3): 74-78. [杨立彬, 黄强, 武见等. 红碱淖湖泊面积变化影响因素及预测分析. 干旱区资源与环境, 2014, **28**(3): 74-78.]
- [14] Wang WK, Gong CC, Zhang ZY *et al.* Research status and prospect of the subsurface hydrology and ecological effect in arid regions. *Advances in Earth Science*, 2018, **33**(7): 702-718. [王文科, 宫程程, 张在勇等. 旱区地下水文与生态效应研究现状与展望. 地球科学进展, 2018, **33**(7): 702-718.]
- [15] Ma XD, Fan LM, Zhang XT *et al.* Driving force analysis for water and wetlands evolution at Yushenfu mining area. *Journal of China Coal Society*, 2015, **40**(5): 1126-1133. [马雄德, 范立民, 张晓团等. 榆神府矿区水体湿地演化驱动力分析. 煤炭学报, 2015, **40**(5): 1126-1133.]
- [16] Pöschke F, Nützmans G, Engesgaard P *et al.* How does the groundwater influence the water balance of a lowland lake? A field study from Lake Stechlin, north-eastern Germany. *Limnologica*, 2018, **68**: 17-25.
- [17] Rudnick S, Lewandowski J, Nützmans G. Investigating groundwater-lake interactions by hydraulic heads and a water balance. *Groudwater*, 2015, **53**(2): 227-237.
- [18] Hajati MC, Mette FM, Pedersen O *et al.* Flow reversals in groundwater-lake interactions; A natural tracer study using $\delta^{18}\text{O}$. *Limnologica*, 2018, **68**: 26-35.
- [19] Fleckenstein JH, Krause S, Hannah DM *et al.* Groundwater-surface water interactions; new methods and models to improve understanding of progresses and dynamics. *Advances in Water Resources*, 2010, **33**(11): 1291-1295.
- [20] Zhang J, Wang XS, Hu XN *et al.* Research on the recharge of the lakes in the Badain Jaran Desert; Simulation study in the Sumu Jaran lakes area. *J Lake Sci*, 2017, **29**(2): 467-479. DOI: 10.18307/2017.0223. [张竞, 王旭升, 胡晓农. 巴丹吉林沙漠湖泊水分补给机制的模拟——以苏木吉林湖区为例. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 467-479.]
- [21] Feng HB, Dong SG, Liu XB *et al.* Evolution mechanism of groundwater system in the opencast coalmine area in the typical prairie. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, **46**(1): 163-172. [冯海波, 董少刚, 刘晓波等. 典型草原露天煤矿区地下水环境演化机理研究. 水文地质工程地质, 2019, **46**(1): 163-172.]
- [22] Mamat A, Halik M, Keram A *et al.* Remote sensing monitoring of bosten lake water resources and its driving factor analysis. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2017, (4): 184-192. [阿依努尔·买买提, 玉米提·哈力克, 阿依加马力·克然木等. 博斯腾湖面积变化遥感监测及其驱动因素分析. 新疆农业科学, 2017, (4): 184-192.]
- [23] Ala-Aho P, Rossi PM. Interaction of esker groundwater with headwater lakes and streams. *Journal of Hydrology*, 2013, **500**: 144-156.
- [24] Feng HB. Groundwater system evolution of the opencast coalmine area in hulunbuir prairie, Inner Mongolia, north China [Dissertation]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2017. [冯海波. 内蒙古呼伦贝尔草原露天煤矿区地下水系统演化研究[学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017.]