

人工补水条件下白洋淀湿地演变研究

王凯霖^{1,2)}, 李海涛^{2)*}, 吴爱民³⁾, 李木子²⁾, 周 艺⁴⁾, 李文鹏²⁾

1) 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2) 中国地质环境监测院, 北京 100081;
3) 中国地质调查局, 北京 100037; 4) 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094

摘 要: 近几十年来, 在自然因素和人类活动的双重作用下, 白洋淀湿地及其周边环境发生了明显变化。本文采用综合识别遥感提取技术, 对近 40 年来白洋淀湿地面积信息进行提取并分析其变化特征, 在 1986—1989 年间, 湿地面积增加 253.29 km²; 1989—1994 年间, 湿地面积减少 181.61 km²; 1994—1997, 湿地面积增加 158.17 km²; 1997—2004 年间, 湿地面积减少 170.37 km²; 2004—2016 年, 湿地面积增加 106.09 km²。根据湿地面积提取结果, 分析湿地面积与地表水位和地下水位的关系, 确定了白洋淀湿地面积变化的主要控制因子为地表水位, 其与白洋淀湿地面积的相关性非常好, 相关系数达 0.99; 白洋淀湿地面积与周边区域的地下水位动态变化呈正相关性, 说明湿地渗漏量对周边区域的地下水位动态变化有一定影响。针对白洋淀湿地地表水位, 采用水均衡法, 分析了影响白洋淀地表水位的主控因素, 主要为白洋淀湿地的人淀流量和蒸发蒸腾消耗量。通过白洋淀湿地演变及其影响因素的分析, 初步揭示了白洋淀湿地与水文过程的相互影响机制, 可为制定白洋淀湿地生态修复和水资源可持续利用方案等提供技术支撑和理论参考。

关键词: 白洋淀湿地; 综合提取; 面积变化; 地表水位; 地下水位

中图分类号: P931.7; S273.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2018.071102

An Analysis of the Evolution of Baiyangdian Wetlands in Hebei Province with Artificial Recharge

WANG Kai-lin^{1, 2)}, LI Hai-tao^{2)*}, WU Ai-min³⁾, LI Mu-zi²⁾, ZHOU Yi⁴⁾, LI Wen-peng²⁾

1) School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;
2) China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081;
3) China Geological Survey, Beijing 100037;
4) Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Science, Beijing 100094

Abstract: In recent decades, Baiyangdian Wetlands and its surrounding environments have changed a lot due to the impacts of natural factors and human activities. In this paper, the comprehensive identification method based on remote sensing technique was adopted to extract the area information of Baiyangdian Wetlands. And the area variation characteristics of Baiyangdian Wetlands were analyzed. The area was increased by 253.29 km² from 1986 to 1989, reduced by 181.61 km² from 1989 to 1994, increased by 158.17 km² from 1994 to 1997, reduced by 170.37 km² from 1997 to 2004, and increased by 106.09 km² from 2004 to 2016. According to the extracted results of area, the relationship between wetlands area and surface water level and groundwater level is analyzed. The major controlling factor of Baiyangdian Wetlands area as well as the surface water level was determined by establishing the good relation between area and surface water levels. The correlation coefficient of these two items is 0.99. There is a positive correlation between Baiyangdian Wetlands area and the dynamic change of

本文由中国地质调查局项目(编号: DD20189142; DD20160239)资助。为中国地质调查局、中国地质科学院 2017 年度地质科技十大进展第七名“多要素多技术城市地质调查有力支撑雄安新区总体规划编制”的成果之一。

收稿日期: 2018-07-04; 改回日期: 2018-07-10; 网络首发日期: 2018-07-11。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 王凯霖, 男, 1991 年生。博士研究生。水文地质学专业, 主要从事生态水文方面研究。通讯地址: 100083, 北京市海淀区学院路 29 号。E-mail: wangkl_cugb@163.com。

*通讯作者: 李海涛, 男, 1979 年生。博士, 教授级高级工程师。主要从事水工环地质方面研究工作。通讯地址: 100081, 北京市海淀区大慧寺 20 号。电话: 010-62179779。E-mail: liht@mail.cigem.gov.cn。

groundwater level in the surrounding areas, which indicates that the leakage of wetlands has a certain influence on the dynamic change of the groundwater level in the surrounding areas. In order to study the influencing factors of surface water level in Baiyangdian Wetlands, the authors used the water balance method. The main factors which can influence the surface water level a lot are inflows to the wetlands and the evapotranspiration consumption. Through the analysis of the area evolution of Baiyangdian Wetlands and its influencing factors, the impact mechanism between the evolution of Baiyangdian Wetlands and the hydrological process is preliminarily revealed, which can provide technical support and theoretical reference for formulating strategies of ecological restoration and sustainable utilization of water resources in Baiyangdian Wetlands.

Key words: Baiyangdian Wetlands; comprehensive extraction; area variation; surface water level; groundwater level

湿地是珍贵的自然资源,也是重要的生态系统,具有不可替代的综合功能。我国拥有湿地面积 6 600 多万公顷,约占世界湿地面积的 10%,居亚洲第一位,世界第四位(包云和马广仁,2013)。白洋淀湿地是我国众多湿地中的一个小型湿地,享有“华北之肾”、“华北明珠”的美誉。随着 2017 年 4 月 1 日,中共中央国务院宣布在河北雄县、安新县、容城县设立雄安新区以来,在地域区划上隶属于雄安新区的白洋淀湿地受到举世关注。然而,近年来,在人类活动和水文条件变化的共同影响下,白洋淀湿地及其周边的环境发生了巨大变化,导致湿地及其所承载的生态环境不断恶化,湿地面积不断萎缩。

针对白洋淀湿地出现的各种地质环境问题,研究者们开展了大量的研究工作。关于白洋淀湿地演化及退化过程研究,江波等(2016)分析了 1974—2011 年白洋淀土地覆盖时空变化特征;王京等(2010)分析了近 40 年来,白洋淀湿地土地覆盖变化过程;常利伟(2014)分析了白洋淀湖群的演变趋势和规律。

关于白洋淀湿地及其周边的水文过程研究,高彦春等(2009, 2014)从流域尺度上,分析了白洋淀流域降水、径流等水文条件的变化以及所面临的生态环境问题;杨春霄(2010)研究发现,受人类活动和气候变化双重影响,降水对白洋淀天然入淀量的影响程度在减弱,白洋淀天然入淀量逐年减少;张东江等(2014)对入淀天然径流量进行了还原,分析了入淀径流量多年来的变异程度;刘建芝和魏建强(2007)结合淀水位变化,对白洋淀湿地蒸发量和渗漏量进行了估算。

关于水文要素对白洋淀湿地演变过程的影响机制研究,刘春兰等(2007)认为气候变化是白洋淀湿地退化的主要原因,气候变化通过改变湿地的水文特征,减少湿地的水源补给,增加水资源消耗,使得湿地退化萎缩;王朝华等(2011)结合白洋淀湿地退化现状,通过分析降水量、蒸发量、入淀量和调水量等因子的多年变化,定性分析了跨流域调水

对恢复白洋淀生态环境的重要性;王京等(2010)认为降水量的减少、蒸发量的增大和入淀径流等的变化是近 40 年来白洋淀湿地面积退化的主要影响因素。张素珍等(2007)和董娜(2009)通过对上游径流量变化分析,认为入淀径流量的减少是白洋淀退化的主要原因。徐卫华等(2005)分析了湿地苇地面积变化与淀水位变化间的关系。Cui 等(2010)和董文君(2011)针对不同的水文条件类型,对白洋淀湿地的生态补水进行了估算。

上述研究多是围绕白洋淀湿地各水文因素的多年变化,对湿地面积演变进行的定性评价分析,系统性、定量或者半定量分析水文要素对白洋淀湿地演变过程的影响机制较为欠缺。基于前人研究现状,本文采用遥感技术手段,对白洋淀湿地面积进行提取,定量分析了多年来白洋淀湿地演变过程;通过分析白洋淀湿地地表水水位、周边地区地下水位与白洋淀湿地面积之间的关系,以白洋淀湿地地表水水位和周边地区地下水位为因子,通过水均衡计算量化影响地表水位变化的补排量大小,初步揭示了各水文因素对白洋淀湿地演变过程的影响程度。通过对人工补给方式下白洋淀湿地演变过程及其影响因素的分析,明确了控制白洋淀湿地面积的主要因子及其影响因素,进而为白洋淀湿地生态环境保护提供技术和决策支撑。

1 研究区概况

白洋淀湿地位于河北省安新县和雄县境内,是华北平原上最大的湖泊型湿地,被誉为“华北之肾”。白洋淀湿地是大清河河系中重要的蓄水枢纽,承担着缓洪治涝和蓄水灌溉的重要任务,从南、西、北三向接纳 9 条入湖河流,分别为潞龙河、孝义河、唐河、府河、漕河、瀑河、萍河、北拒马河、南拒马河,出泄河流为赵王新河(图 1)。

自 20 世纪 50 年代以来,白洋淀流域各级河流上游陆续修建水库 134 座,河流径流量减少甚至干涸。目前,入淀河流中,仅有大清河北支南拒马河和白沟河来水经白沟引河、新盖房闸所入淀,为天

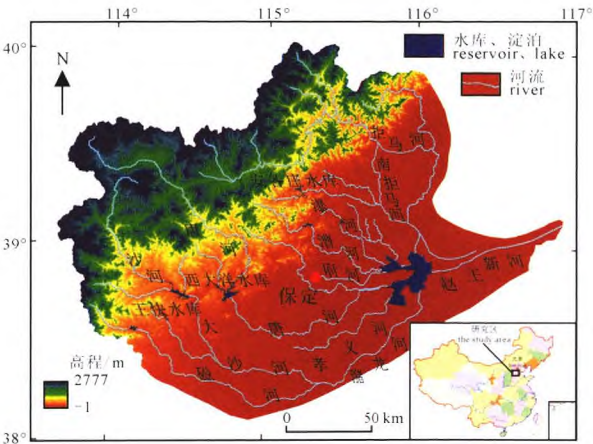


图1 白洋淀流域地理位置及水系概图
Fig. 1 The sketch map of the location and rivers of Baiyangdian Watershed

然状态下白洋淀主要的入淀量; 大清河南支赵王河系 8 条入淀河流除府河外, 其他河流仅在汛期有少量径流入淀, 大部分时间完全处于干涸状态。

白洋淀淀区四周以堤为界, 淀区内纵横交错的 3 700 余条沟壕将全淀分割成 143 个大小不等、又相互连通的淀泊。目前, 白洋淀湿地淀区总面积约 366 km², 其中包括了湿地(主要为开阔水体和芦苇区)和非湿地(农田、居民区)等。由于人为和自然两方面因素的影响, 白洋淀淀区近 40 年间经历了多次干涸, 湿地面积不断退化, 产生了一系列的生态地质环境问题。自 20 世纪 80 年代以来, 为解决白洋淀湿地缺水、生态系统失衡的局面, 河北省通过海河流域的王快水库、安各庄水库、西大洋水库和岳城水库等以及“引黄济淀”工程对白洋淀进行了人工调水补给(张赶年, 2013)。

历史上, 白洋淀周边的地表水与地下水相互转化关系较为复杂, 存在地表水与地下水双向转化关系。近 40 年来, 由于超量开采地下水造成地下水位持续下降, 地下水与地表水之间的联系发生了根本性改变, 白洋淀由丰水期地表水补给地下水、枯水期地下水补给地表水的双向转化关系已经完全转变为白洋淀水单向渗漏补给地下水(王秀艳, 2011)。在本文研究中, 主要针对近 40 年来, 在地表水单向补给地下水的条件下, 分析白洋淀湿地面积的演变特征及其影响因素。

2 白洋淀湿地面积演变过程

2.1 湿地面积遥感提取方法

湿地具有从水体向陆地过渡转变的属性, 从空间区域来说, 监测难度较大。随着空间遥感技术的发展, 国内外学者提出了多种基于遥感技术的湿地信息提取方法, 不同提取方法具有各自不同特点。

针对白洋淀湿地, 林皓波等(2012)采用 NDWI 水体指数方法对白洋淀湿地资源进行了监测研究; 沈占锋等(2016)提出了基于协同计算的白洋淀湿地时序水体信息提取方法; 针对白洋淀湿地及其组成地物面积, 王凯霖等(2017)提出了采用多种方法相互结合的白洋淀湿地综合提取方法。在本文研究中, 为了分析湿地面积的演变过程, 采用王凯霖等(2017)提出的白洋淀湿地面积信息综合提取方法。该方法通过对比分析, 确定最佳湿地和水体提取方法, 利用改进的湿度分量方法和谱间关系法分别对湿地和水体信息进行定量化提取, 然后对淀区内湿地和水体进行几何拓扑, 将芦苇区和开阔水体区分开, 得到淀区内湿地及其各部分的面积信息。该方法已证明在白洋淀湿地有较好的应用效果。

2.2 遥感数据

根据王凯霖等(2017)研究成果, 针对白洋淀湿地及其周边地区, 选择每年 4 月份的遥感数据进行解译和信息提取工作, 效果较好。因为, 在 4—5 月份, 降雨量小, 气候因素对遥感数据质量干扰小; 农田和芦苇混淆较小, 便于提取。本文中, 根据近 40 年来的时间序列和白洋淀湿地地表水位区间(白洋淀十方院水文站, 5.3~7.5 m), 选择水位在 5.3 m、5.5 m、6.0 m、6.5 m、7 m、7.4 m 等时刻所对应年份的遥感数据, 共选取 12 景遥感数据(表 1)。遥感数据采用时间序列较长、分辨较好的 Landsat 遥感数据(表 1)。在进行湿地信息提取之前, 对遥感数据分别进行辐射校正和大气校正。

2.3 湿地面积提取

根据王凯霖等(2017)提出的湿地综合识别方法, 对表 1 中各年份的遥感数据进行湿地面积信息提取。各年份的湿地信息提取结果见图 2、表 2 及图 3。

2.4 白洋淀湿地演变过程分析

从图 2、图 3 和表 2 中可以看出, 白洋淀湿地面积的变化近年来并不是一成不变的。从本文遥感解译数据来看, 白洋淀湿地及其地物组成面积的演变经历几个过程:

表 1 采用的 Landsat 数据信息一览表
Table 1 Information of the selected Landsat data

时间	传感器	时间	传感器
1986-03-12	TM	2001-03-08	TM
1989-04-18	TM	2004-04-01	TM
1992-04-16	TM	2007-04-10	TM
1994-03-21	TM	2010-04-02	TM
1997-03-29	TM	2013-05-12	OLI
1998-02-28	TM	2016-04-18	OLI

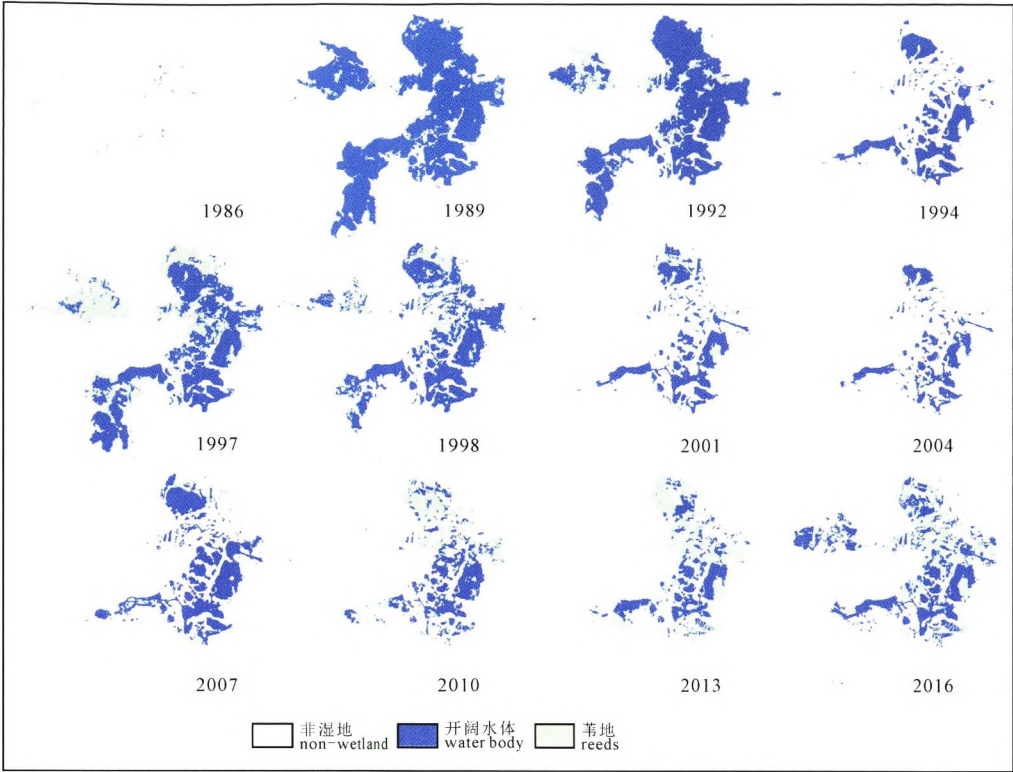


图 2 白洋淀湿地面积遥感解译图(1986—2016 年)
Fig. 2 The area map of Baiyangdian Wetlands extracted from remote sensing data (1986—2016)

表 2 白洋淀湿地面积统计一览表(单位: km ²) Table 2 The area of Baiyangdian Wetlands statistically extracted from remote sensing data (Unit: km ²)				
年份	湿地面积			非湿地 面积
	开阔水体	芦苇	小计	
1986	0.96	5.74	6.70	359.30
1989	232.62	27.37	259.99	106.01
1992	171.09	59.66	230.75	135.25
1994	65.32	13.06	78.38	287.62
1997	128.10	108.45	236.55	129.45
1998	114.39	62.91	177.30	188.70
2001	58.11	36.39	94.50	271.50
2004	42.23	23.95	66.18	299.82
2007	80.43	20.89	101.32	264.68
2010	51.63	67.80	119.43	246.57
2013	46.57	91.40	137.97	228.03
2016	78.27	94.00	172.27	193.73

(1)1986—1989 年间,湿地总体面积迅速增大。相对于 1986 年,到 1989 年湿地总体面积增加了 253.29 km²,开阔水体和芦苇区的面积与湿地总体面积逐年变化一致。其中,开阔水体的面积增加了 234.66 km²,占同期湿地总增加面积的 91.46%;芦苇区面积增加了 21.63 km²,占同期湿地总增加面积的 8.54%。湿地面积迅速增大的原因主要为 1988 年降雨量较大,降雨量超过了 750 mm。

(2)1989—1994 年间,湿地总体面积迅速减少。相对于 1989 年,到 1994 年湿地总体面积减少了 181.61 km²,开阔水体的面积与湿地总体面积逐年

万方数据

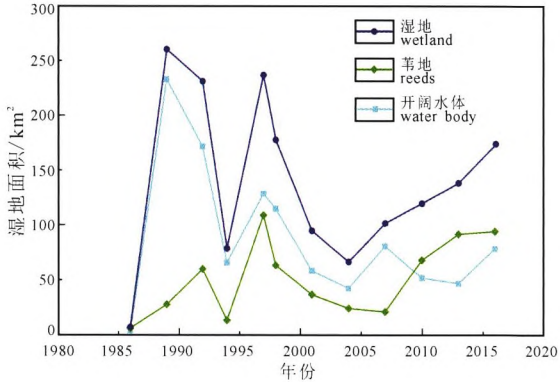


图 3 白洋淀湿地及其地物组成面积曲线
Fig. 3 The area curve of Baiyangdian Wetlands and its components

变化一致,而芦苇区的面积与湿地总体面积变化逐年不一致。开阔水体的面积减少了 167.3 km²,占同期湿地总减少面积的 92.12%。芦苇区面积,在 1989—1992 年间,为增加变化;在 1992—1994 年间,为减少变化。但相对于 1989 年来说,到 1994 年,芦苇区面积减少了 14.31 km²,占同期湿地总增加面积的 7.88%。虽然在此期间,1992 年分别从王快水库、安各庄水库、西大洋进行了调水补淀,湿地面积仍然迅速减少,其主要原因为该期间年降水量小,调水量不足以弥补淀区内的水资源消耗,如 1992 年,总调水为 0.62×10⁸ m³。

(3)1994—1997,湿地总体面积迅速增加。相对于 1994 年,到 1997 年湿地总体面积增加了

158.17 km², 开阔水体和芦苇区的面积与湿地总体面积逐年变化一致。其中, 开阔水体的面积增加了 62.78 km², 占同期湿地总增加面积的 39.69%; 芦苇区面积增加了 95.39 km², 占同期湿地总增加面积的 60.31%。湿地面积迅速增加的原因主要为降雨量较大, 如 1994 年和 1995 年, 年降雨量均接近 750 mm, 导致湿地面积增大。

(4)1997—2004 年, 湿地总体面积逐渐减少。相对于 1997 年, 到 2004 年湿地总体面积减少了 170.37 km², 每年大概减少 24 km², 开阔水体和芦苇区的面积与湿地总体面积逐年变化一致。其中, 开阔水体的面积减少了 85.87 km², 占同期湿地总减少面积的 50.40%; 芦苇区面积减少了 84.50 km², 占同期湿地总减少面积的 49.60%。湿地面积逐年减少的原因主要为年降水量较小, 虽然在 1997—2004 年间经过了几次调水补淀, 调水数量有限, 仅减缓了湿地减少的速度, 如 1998 年和 1999 年调水量分别为 $0.22 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.18 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(5)2004—2016 年, 湿地总体面积逐年增加。相对于 2004 年, 2016 年湿地总体面积增加了 106.09 km², 每年湿地面积约增加 8.8 km², 开阔水体和芦苇区面积与湿地总体面积逐年变化均不一致。开阔水体面积, 在 2004—2007 年间, 为增加变化; 在 2007—2013 年间, 为减少变化; 2013—2016 年间, 为增加变化。但相对于 2004 年来说, 到 2016 年, 开阔水体面积增加了 36.04 km², 占同期湿地总增加面积的 33.97%。芦苇区面积, 在 2004—2007 年间, 为减少变化; 在 2007—2016 年间, 为增加变化。但相对于 2004 年来说, 到 2016 年, 芦苇区面积增加了 70.05 km², 占同期湿地总增加面积的 66.03%。这主要是由于 2006 年开始频繁跨流域调水补给白洋淀, 芦苇恢复生长较好, 湿地面积增加较大, 如在 2006、2008 年, 引黄入淀的水量分别为 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $1.57 \times 10^8 \text{ m}^3$, 充分保证了白洋淀入淀水量。

虽然白洋淀湿地面积在 1986—2016 年间呈现出不同变化特征, 但是相对于建国初期白洋淀湿地面积 366 km² 来说, 总体面积仍然有所退化。从湿地地物组成来分析, 在前期, 特别是 1986—1997 年间, 湿地面积的变化基本受开阔水体面积变化的控制; 1997—2004 年, 湿地面积主要受开阔水体和芦苇区面积共同控制; 2004—2016 年, 白洋淀湿地面积的变化主要受芦苇区面积变化的控制, 芦苇区面积增加较多, 开阔水体面积整体变化不大。

3 湿地面积演变与水位的关系

白洋淀湿地的演变过程与其所依附的水环境变化过程是密不可分的, 而白洋淀湿地及其周边地区水环境变化的关键因素是该区的水文过程。各水

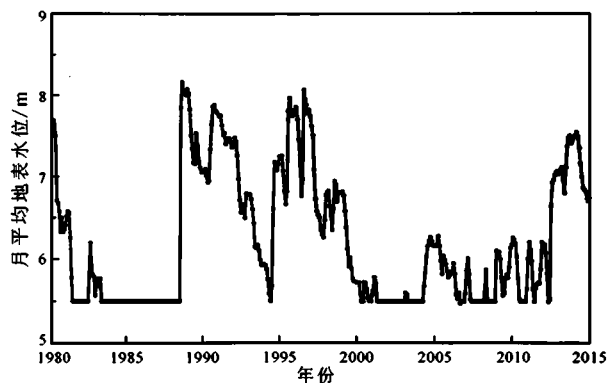


图 4 1980—2016 年间白洋淀湿地地表水位曲线图
Fig. 4 The curve of surface water level in Baiyangdian Wetlands from 1980 to 2016

文要素通过影响湿地淀泊补排量的变化, 进而影响湿地面积的变化, 而各水文要素的变化具体表现因子为地表水水位和地下水水位。

3.1 湿地面积演变与地表水位的关系

图 4 为白洋淀湿地十方院水文站 1980—2015 年的月平均地表水位动态曲线。多年来, 白洋淀湿地地表水位波动较大, 高水位年份能达到 7 m 多, 低水位年份则导致干淀(当地表水位低于 5.3 m(大沽高程 6.5 m)时, 白洋淀成为一个个独立的小淀泊, 定义为干淀)。其中, 1983 年 6 月到 1988 年 7 月和 2001 年 5 月到 2003 年 2 月两个时段, 白洋淀湿地长期处于干淀状态, 特别是在 1983—1988 年, 干淀时间长达 5 年之久; 另外, 在 1982、1994、2006—2008 也出现短时期的干淀现象。

图 5 为通过遥感解译的白洋淀湿地面积与对应时段的地表水位之间的相关性分析散点图, 相关系数达 0.99, 说明白洋淀湿地面积与白洋淀地表水位存在明显的线性相关关系, 白洋淀湿地面积的大小受地表水位高低的控制。

根据图 5, 湿地面积与地表水位的关系可以用公式(1)表达:

$$y = 98.41x - 576.15 \quad \text{公式(1)}$$

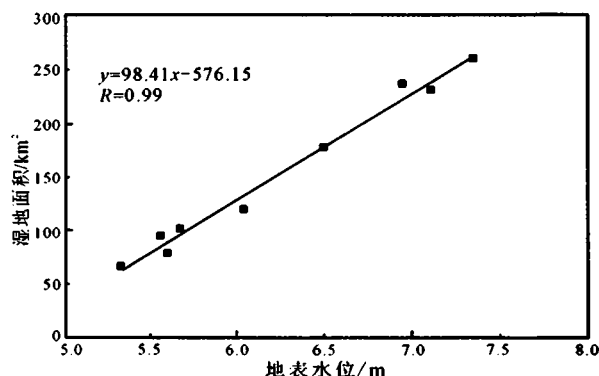


图 5 白洋淀湿地面积与地表水位散点图
Fig. 5 The scatter map between areas and surface water levels of Baiyangdian Wetlands

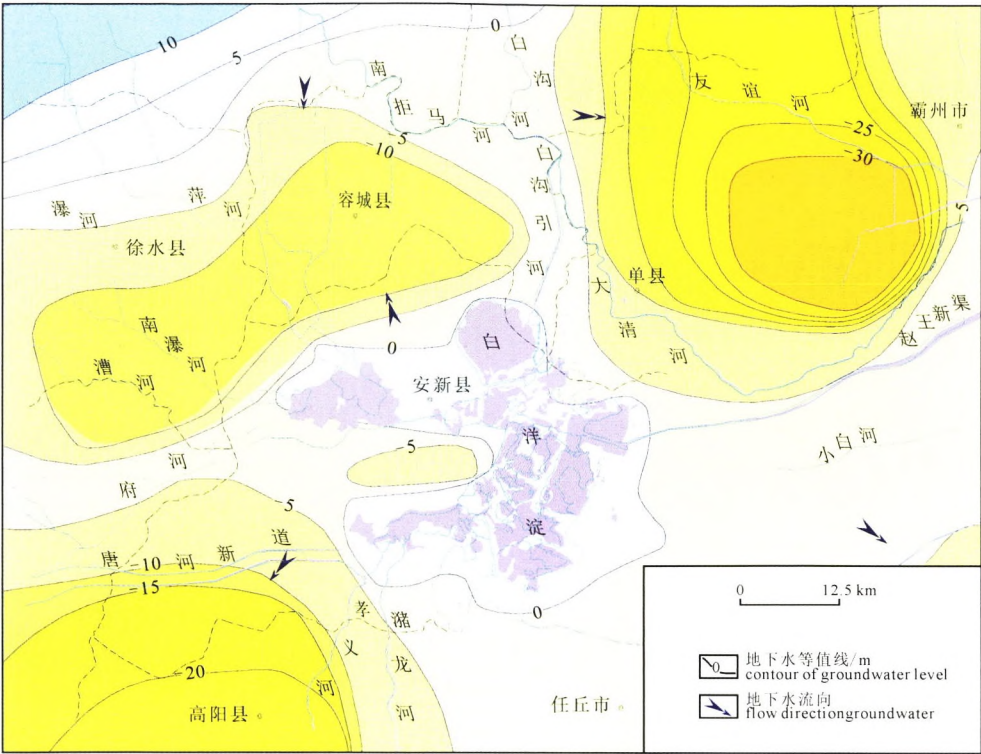


图 6 白洋淀湿地及周边地区浅层地下水位等值线图(2017 年 6 月)
Fig. 6 Contour map of groundwater level in shallow aquifers in Baiyangdian Wetlands and its surrounding areas (June, 2017)

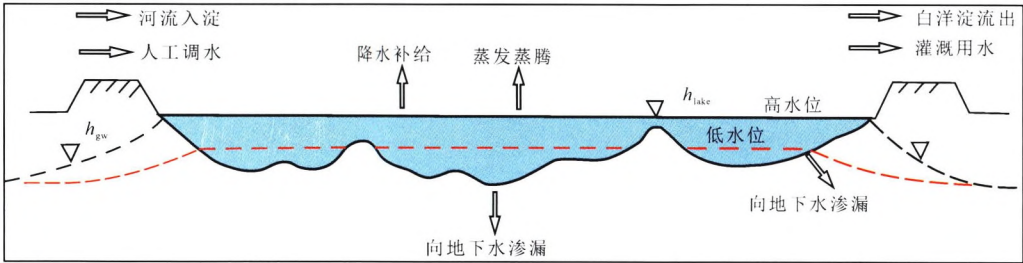


图 7 白洋淀湿地水均衡要素示意图
Fig. 7 The water balance in Baiyangdian Wetlands

其中: y 为湿地面积(km^2);
 x 表示地表水位(m).

3.2 湿地地表水渗漏对地下水位的影响

在自然和人为因素的影响下,近 40 年来,白洋淀湿地地下水与地表水之间转化关系发生了根本性改变,白洋淀由丰水期地表水补给地下水、枯水期地下水补给地表水的双向转化关系已经完全转变为白洋淀水单向渗漏补给地下水(王秀艳, 2011)。根据 2017 年度浅层地下水位统测绘制的地下水位等值线图,也验证了白洋淀湿地地表水单向补给地下水的现状(图 6)。

图 7 从垂向剖面显示了白洋淀湿地在高水位时期和低水位时期,地表水位和地下水位相互之间的变化关系。

白洋淀湿地地表水对地下水的渗漏量问题一直一个悬而未解的问题。早期,河北省水利科学研究所

对白洋淀湿地的渗漏量进行过估算,但一直缺乏较为精确的监测数据进行验证(刘建芝和魏建强, 2007)。

白洋淀湿地周边的地下水监测站点较为缺乏。

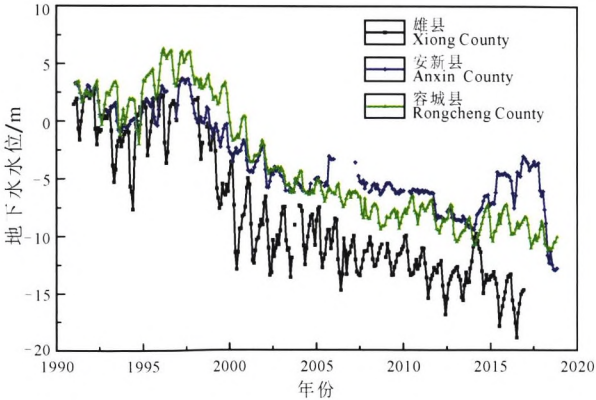


图 8 1990—2016 年间的地下水位变化过程
Fig. 8 The process of the groundwater level changes from 1990 to 2016

图 8 为分别位于雄县、安新和容城城区附近的三个国家级地下水专门监测孔(浅层)的地下水动态曲线图。多年来,三个监测孔的总体变化曲线基本一致,均呈不断下降趋势。

从白洋淀湿地面积的变化过程(图 3)和地下水位的变化过程(图 8)分析,特别是采用离白洋淀湿地最近的安新县地下水位监测数据,在白洋淀湿地面积处于较高水平的时候,地下水位也处于较高的位置;而湿地面积处于较低水平的时候,地下水位也处于较低的位置。说明白洋淀湿地面积与周边地区地下水位呈正相关关系,进而说明湿地渗漏量与周边区域的地下水位动态变化有一定相互关系(白洋淀湿地面积越大,渗漏量也越大)。但是,针对白洋淀湿地地表水对周边地区地下水的渗漏量以及渗漏影响范围、对地下水位影响的量化研究,仍有待于进一步开展细致的地表水-地下水转化关系的监测和研究工作,如在白洋淀湿地周边建立完善的地下水监测网、建立湿地蒸散量观测系统等。

4 白洋淀湿地地表水位影响因素分析

白洋淀湿地地表水位受多重因素的影响,主要包括降水补给量、入淀流量(包括河流入淀和人工调水)、蒸发蒸腾量、渗漏量、白洋淀流出量和灌溉用水量等。图 7 为白洋淀湿地各水均衡要素示意图,地表水位的变化是众多要素综合影响的结果。

4.1 水均衡要素

根据收集和掌握的数据资料以及前人的研究成果,对白洋淀湿地的多年平均(2006—2015 年)的各水均衡要素进行分析。

4.1.1 补给项

(1)降水补给量

根据安新县气象站降水量监测数据统计分析,多年平均(2006—2015 年)年降水量为 0.493 m/a。

(2)入淀流量

根据《保定市水资源公报》(以下简称公报),2006—2011 年,白沟引河、府河、孝义河无入淀量(保定水市利局,2006,2007,2008,2009,2010,2011),2012—2015 年的河流入淀量见表 3。

根据《公报》及参考文献(董文君,2011),2006

表 3 2012—2015 年河流入淀量(单位: 亿 m³)
Table 3 The river inflow rate of Baiyangdian Wetlands (Unit: 10⁸ m³)

年份	白沟引河(新盖房站)	府河(小望亭站)	孝义河
2012	1.588	0.212	0.059
2013	1.602	0.311	0.000
2014	0.370	0.710	0.000
2015	0.057	0.396	0.000

注: 据保定水市利局,2012,2013,2014,2015。

表 4 白洋淀湿地人工调水量(单位: 亿 m³)
Table 4 The water transfer to Baiyangdian Wetlands (Unit: 10⁸ m³)

调水时间	调水水源	调水量
2006 年 3 月—2006 年 4 月	安各庄水库	0.569
2006 年 12 月—2007 年 3 月	黄河	1.001
2008 年 3 月—2008 年 6 月	黄河	1.576
2009 年 6 月—2009 年 7 月	安各庄水库	0.180
2009 年 11 月—2010 年 1 月	黄河	1.108
2011 年 1 月—2011 年 4 月	黄河	0.934
2011 年 12 月—2012 年 1 月	黄河	0.468

年以后,白洋淀调水以“引黄入淀”工程为主,人工调水量见表 4。

4.1.2 排泄项

(1)蒸发蒸腾

根据河北省水利水电勘测设计研究院关于蒸发皿蒸发量与自然水面蒸发量关系研究成果(刘建芝和魏建强,2007)及保定气象站蒸发监测数据,估算白洋淀湿地自然水面的蒸发量;根据河北省水利水电勘测设计研究院调查的苇田用水量与稻田近似的结果及美国水稻蒸腾量为自然水面蒸发的 1.0~1.2 倍实验资料,蒸腾量为自然水面蒸发的 1.2 倍来估算。

(2)湿地渗漏量

渗漏损失包括侧向渗漏和垂直渗漏两部分,在不发生完全干淀的情况下,垂直渗漏量可忽略,侧向渗漏量随着水位升降而增减。为了便于计算,文章中采用河北省水科所侧渗模拟研究成果,不同地表水位与周边渗漏量间存在线性关系(刘建芝和魏建强,2007)(表 5)。采用表 5 中数据,可估算每年白洋淀湿地的渗漏量。

(3)白洋淀流出量

在洪水或调水过多年份,经调蓄后由枣林庄枢

表 5 白洋淀水位与周边渗漏量关系

Table 5 The relationship between the water level of Baiyangdian Wetlands and the surrounding leakage

水位/m	4.900	6.000	6.500	7.000	7.300	8.500	9.000
周边渗漏量/(×10 ⁴ m³ · d ⁻¹)	0.000	1.620	3.482	5.628	6.488	11.147	13.074

表 6 白洋淀湿地流出量(单位: 亿 m³)

Table 6 The outflow rate of Baiyangdian Wetlands (Unit: 10⁸ m³)

年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
流出量	0	0	0	0.327	0.165	0.112	0	0.361	0	0

表 7 白洋淀湿地灌溉用水量(单位: 亿 m³)

Table 7 The water consumption for irrigation in Baiyangdian Wetlands (Unit: 10 ⁸ m ³)										
年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
灌溉用水量	0.057	0.033	0.024	0.036	0.024	0.024	0.060	0.060	0.060	0.060

表 8 2006—2015 年多年平均水均衡(单位: 亿 m³/a)

Table 8 The average annual water balance of Baiyangdian Wetlands (2006—2015) (Unit: 10 ⁸ m ³ /a)						
补给项			排泄项			蓄水量变化
入淀流量	降水补给量	蒸发蒸腾量	渗漏量	流出量	灌溉用水量	0.138
1.103(66.0%)	0.567(34.0%)	1.169(76.3%)	0.222(14.5%)	0.097(6.3%)	0.044(2.9%)	

纽控制下泄, 枣林庄枢纽是白洋淀出口唯一的控制性工程。根据《公报》, 表 6 为白洋淀湿地历年流出水量。

(4)灌溉用水量

根据《公报》, 灌溉利用的白洋淀水量见表 7。

4.2 水均衡及影响因素分析

表 8 为白洋淀湿地多年平均水均衡。

根据水均衡计算结果, 在均衡期内, 白洋淀湿地多年平均水均衡为正均衡。

白洋淀湿地水资源主要补给来源为入淀流量(1.103 亿 m³/a, 占总补给量的 66.0%), 其次为降水补给量(0.567 亿 m³/a, 占总补给量的 34.0%)。目前来看, 在天然河道径流较小和气候变化等条件的制约下, 人工调水是保障白洋淀湿地地表水水位能够控制在合理范围的主要途径, 进而人工调水的保障程度也直接影响了白洋淀湿地面积的变化。

白洋淀湿地水资源主要排泄项为蒸发蒸腾量(1.169 亿 m³/a, 占总排泄量的 76.3%), 其次为白洋淀湿地渗漏量(0.222 亿 m³/a, 占总排泄量的 14.5%), 再其次为白洋淀湿地下游流出量(0.097 亿 m³/a, 占总排泄量的 6.3%), 最后为白洋淀湿地内的灌溉用水量(0.044 亿 m³/a, 占总排泄量的 2.9%)。可以看出, 白洋淀地表水面蒸发和植被的蒸腾量为白洋淀湿地水资源的主要消耗量, 也是影响白洋淀湿地地表水位的主要因素之一; 白洋淀湿地的渗漏量虽然对地表水的影响较小, 但对周边区域的地下水位有一定的影响, 而且, 在考虑生态需水量的时候, 也是一个不容忽视的水量损失因素; 白洋淀湿地的下游流出量和灌溉用水量基本在水资源消耗中可以忽略不计, 但是, 在白洋淀下游有一定的流出量, 是保证白洋淀内水循环的重要途径之一, 对白洋淀湿地水质及生态环境的改善具有积极意义, 而灌溉用水随着在白洋淀湿地内实施“退耕还淀”措施的实施, 将彻底消失。

根据中共中央、国务院发布的《河北雄安新区规划纲要》, 要将白洋淀地表水位维持在 6.5~7.0 m 的合理范围之内。除了保障白洋淀湿地入淀水量外(人工调水或河道径流), 如何减少白洋淀湿地内水

资源消耗量, 也是值得研究的重要水资源科学管理课题, 如如何减少白洋淀湿地内的蒸散消耗量; 又如目前准备开展白洋淀湿地清淤工程, 势必会改变白洋淀湿地及周边地区的底部地层渗透能力, 进而会造成白洋淀湿地地表水渗漏量的变化, 需要进行长期监测和科学管理。

5 结论和建议

白洋淀湿地是华北平原上的最大湿地, 也是雄安新区“千年大计”建设的重要组成部分。本文通过遥感提取技术, 对近 40 年来白洋淀湿地面积变化特征进行了分析; 通过分析湿地面积变化特征与湿地地表水位和周边地下水位的相互关系, 以及湿地水均衡分析, 确定了白洋淀湿地面积的主控因子, 并分析了相应的影响因素; 初步揭示了水文过程对白洋淀湿地面积演变过程的影响机制。

主要结论有:

(1)根据白洋淀湿地面积提取结果, 白洋淀湿地面积在 1986—2016 年间呈现出不同变化特征, 但是相对于早期白洋淀湿地 366 km² 的面积, 总体面积仍然是有所退化。1986—1989 年间, 湿地面积增加 253.29 km²; 1989—1994 年间, 湿地面积减少 181.61 km²; 1994—1997, 湿地面积增加 158.17 km²; 1997—2004 年间, 湿地面积减少 170.37 km²; 2004—2016 年, 湿地面积增加 106.09 km²。从湿地组成分析, 1986—1997 年间, 湿地面积变化基本受开阔水体面积变化控制; 1997—2004 年, 湿地面积变化主要受开阔水体和芦苇区面积变化共同控制; 2004—2016 年, 湿地面积变化主要受芦苇区面积变化控制。

(2)近 40 年来, 白洋淀湿地面积受白洋淀湿地地表水位高低的控制, 两者之间的相关性系数达 0.99。

(3)白洋淀湿地面积与周边区域的地下水位动态变化呈正相关性, 湿地地表水单向补给周边地区地下水, 渗漏补给的数量和影响范围有待于进一步研究。

(4)白洋淀湿地多年平均水资源均衡状态为正

均衡。补给项主要包括入淀流量和降水补给, 分别为 1.103 亿 m^3/a (占总补给量的 66.0%)和 0.567 亿 m^3/a (占总补给量的 34.0%)。排泄项主要包括蒸发蒸腾量、渗漏量、流出量和灌溉用水量等, 分别为 1.169 亿 m^3/a (占总排泄量的 76.3%)、0.222 亿 m^3/a (占总排泄量的 14.5%)、0.097 亿 m^3/a (占总排泄量的 6.3%)和 0.044 亿 m^3/a (占总排泄量的 2.9%)。

(5)在补给项中, 影响白洋淀湿地地表水位的主要因素为入淀流量(天然径流或人工调水), 目前, 人工调水是保障白洋淀湿地地表水位能够控制在合理范围的主要途径; 在排泄中, 影响白洋淀湿地地表水位的主导因素为蒸发蒸腾消耗, 湿地渗漏量、流出量等虽然对地表水水位变化影响较小, 但对周边地下水动态变化的影响、生态需水、白洋淀水质及生态环境保护作用等仍然不可忽略。

目前, 雄安新区正处于高速建设过程之中, 在城市规划建设与运行管理的过程中, 白洋淀湿地及周边的环境势必会发生翻天覆地变化, 如根据《河北雄安新区规划纲要》, 将实施恢复淀泊水位、退耕还淀、生态修复等措施, 白洋淀湿地及其周边的水文过程也将发生相应的改变。下一步, 我们将在白洋淀湿地及周边地区建立完善的地下水监测网和湿地蒸散量观测系统, 加强白洋淀湿地及其周边地区的地质环境监测工作, 实时更新和跟踪白洋淀湿地的水文动态变化过程, 为制定白洋淀湿地生态修复和水资源可持续利用方案等提供技术支撑和理论参考, 为国家“千年大计”献言献策。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. DD20189142 and DD20160239).

参考文献:

- 包云, 马广仁. 2013. 中国湿地报告[M]. 北京: 中国林业出版社.
- 保定市水利局. 2006. 保定市水资源公报[R]. 保定: 保定市水利局.
- 保定市水利局. 2007. 保定市水资源公报[R]. 保定: 保定市水利局.
- 保定市水利局. 2008. 保定市水资源公报[R]. 保定: 保定市水利局.
- 保定市水利局. 2009. 保定市水资源公报[R]. 保定: 保定市水利局.
- 保定市水利局. 2010. 保定市水资源公报[R]. 保定: 保定市水利局.
- 保定市水利局. 2011. 保定市水资源公报[R]. 保定: 保定市水利局.
- 保定市水利局. 2012. 保定市水资源公报[R]. 保定: 保定市水利局.
- 保定市水利局. 2013. 保定市水资源公报[R]. 保定: 保定市水利局.

局.

- 保定市水利局. 2014. 保定市水资源公报[R]. 保定: 保定市水利局.
- 保定市水利局. 2015. 保定市水资源公报[R]. 保定: 保定市水利局.
- 常利伟. 2014. 白洋淀湖群的演变研究[D]. 吉林: 东北师范大学.
- 董娜. 2009. 白洋淀湿地生态干旱及两库联通补水分析[D]. 保定: 河北农业大学.
- 董文君. 2011. 基于生态需水和生态水权分析的白洋淀湿地补水研究[D]. 南京: 南京信息工程大学.
- 高彦春, 王晗, 龙笛. 2009. 白洋淀流域水文条件变化和面临的生态环境问题[J]. 资源科学, 31(9): 1506-1513.
- 高彦春, 王金凤, 封志明. 2017. 白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系[J]. 中国生态农业学报, 25(4): 467-477.
- 江波, 肖洋, 马文勇, 欧阳志云. 2016. 1974—2011 年白洋淀土地覆盖时空变化特征[J]. 湿地科学与管理, 12(1): 38-42.
- 林皓波, 吴新玲, 刘菲, 边静. 2012. 白洋淀湿地资源的遥感监测[J]. 中南林业科技大学学报, 32(4): 127-130.
- 刘春兰, 谢高地, 肖玉. 2007. 气候变化对白洋淀湿地的影响[J]. 长江流域资源与环境, 16(2): 245-250.
- 刘建芝, 魏建强. 2007. 白洋淀蒸发渗漏与补水量计算分析[J]. 水科学与工程, (1): 15-16.
- 沈占锋, 李均力, 于新菊. 2016. 基于协同计算的白洋淀湿地时序水体信息提取[J]. 地球信息科学学报, 18(5): 690-698.
- 王朝华, 王子璐, 乔光建. 2011. 跨流域调水对恢复白洋淀生态环境重要性分析[J]. 南水北调与水利科技, 9(3): 138-141.
- 王京, 卢善龙, 吴炳方, 闫娜娜, 裴亮. 2010. 近 40 年来白洋淀湿地土地覆被变化分析[J]. 地球信息科学学报, 12(2): 292-300.
- 王凯霖, 赵凯, 李海涛, 张宝匀, 李文鹏. 2017. 基于综合识别方法的河北白洋淀湿地提取研究[J]. 现代地质, 31(6): 1294-1300.
- 王秀艳. 2011. 白洋淀湿地系统地表水和地下水相互关系的研究[D]. 保定: 河北农业大学.
- 徐卫华, 欧阳志云, IRISVAN D, 郑华, 王效科, 苗鸿, 曹全虎. 2005. 白洋淀地区近 16 年芦苇湿地面积变化与水位的关系[J]. 水土保持学报, 19(4): 181-184, 189.
- 杨春霄. 2010. 白洋淀入淀水量变化及影响因素分析[J]. 地下水, 32(2): 110-112.
- 张东江, 哈建强, 史洪飞. 2014. 白洋淀入淀流量变异程度分析[J]. 水资源保护, 30(1): 43-47.
- 张赶年. 2013. 白洋淀湿地补水的生态补偿研究[D]. 南京: 南京信息工程大学.
- 张素珍, 马静, 李贵宝. 2007. 白洋淀湿地面临的生态问题及可持续发展对策[J]. 南水北调与水利科技, 5(4): 53-56.

References:

- BAO Yun, MA Guang-ren. 2013. China Wetland Report[M]. Beijing: China Forestry Publishing House(in Chinese).
- Baoding Water Conservancy Bureau. 2006. Baoding Water Resources Bulletin[R]. Baoding: Baoding Water Conservancy Bureau(in Chinese).
- Baoding Water Conservancy Bureau. 2007. Baoding Water Resources Bulletin[R]. Baoding: Baoding Water Conservancy Bureau(in Chinese).

- Baoding Water Conservancy Bureau. 2008. Baoding Water Resources Bulletin[R]. Baoding: Baoding Water Conservancy Bureau(in Chinese).
- Baoding Water Conservancy Bureau. 2009. Baoding Water Resources Bulletin[R]. Baoding: Baoding Water Conservancy Bureau(in Chinese).
- Baoding Water Conservancy Bureau. 2010. Baoding Water Resources Bulletin[R]. Baoding: Baoding Water Conservancy Bureau(in Chinese).
- Baoding Water Conservancy Bureau. 2011. Baoding Water Resources Bulletin[R]. Baoding: Baoding Water Conservancy Bureau(in Chinese).
- Baoding Water Conservancy Bureau. 2012. Baoding Water Resources Bulletin[R]. Baoding: Baoding Water Conservancy Bureau(in Chinese).
- Baoding Water Conservancy Bureau. 2013. Baoding Water Resources Bulletin[R]. Baoding: Baoding Water Conservancy Bureau(in Chinese).
- Baoding Water Conservancy Bureau. 2014. Baoding Water Resources Bulletin[R]. Baoding: Baoding Water Conservancy Bureau(in Chinese).
- Baoding Water Conservancy Bureau. 2015. Baoding Water Resources Bulletin[R]. Baoding: Baoding Water Conservancy Bureau(in Chinese).
- CHANG Li-wei. 2014. The evolution of Baiyangdian Lake group research[D]. Jilin: Northeast Normal University(in Chinese with English abstract).
- CUI B S, LI X, ZHANG K J. 2010. Classification of hydrological conditions to assess water allocation schemes for Lake Baiyangdian in North China[J]. Journal of Hydrology, 385(1): 247-256.
- DONG Na. 2009. Analysis of ecological drought and supplementing water to Baiyangdian Wetland from two reservoirs linking system[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei(in Chinese with English abstract).
- DONG Wen-jun. 2011. Research on Baiyangdian Wetland supplementing water based on the ecological water demand and ecological analysis of water rights[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese with English abstract).
- GAO Yan-chun, WANG Han, LONG Di. 2009. Changes in hydrological conditions and the eco-environmental problems in Baiyangdian watershed[J]. Resources Science, 31(9): 1506-1513(in Chinese with English abstract).
- GAO Yan-chun, WANG Jin-feng, FENG Zhi-ming. 2017. Variation trend and response relationship of temperature, precipitation and runoff in Baiyangdian Lake Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 25(4): 467-477(in Chinese with English abstract).
- JIANG Bo, XIAO Yang, MA Wen-yong, OUYANG Zhi-yun. 2016. Spatiotemporal Characteristics of the land cover change in Baiyangdian lake from 1974 to 2011[J]. Wetland Science & Management, 12(1): 38-42(in Chinese with English abstract).
- LIN Hao-bo, WU Xin-ling, LIU Fei, BIAN Jing. 2012. Wetland resources monitoring for Baiyangdian lake by remote sensing technology[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 32(4): 127-130(in Chinese with English abstract).
- LIU Chun-lan, XIE Gao-di, XIAO Yu. 2007. Impact of climatic change on Baiyangdian Wetland[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 16(2): 245-250(in Chinese with English abstract).
- LIU Jian-zhi, WEI Jian-qiang. 2007. Calculation and analysis of evaporation, infiltration and water supply[J]. Water Sciences and Engineering Technology, (1): 15-16(in Chinese with English abstract).
- SHEN Zhan-feng, LI Jun-li, YU Xin-ju. 2016. Water information extraction of Baiyangdian wet land based on the collaborative computing method[J]. Journal of Geo-information Science, 18(5): 690-698(in Chinese with English abstract).
- WANG Jing, LU Shan-long, WU Bing-fang, YAN Na-na, PEI Liang. 2010. Land cover change in Baiyangdian Wetland[J]. Journal of Geo-Information Science, 12(2): 292-300(in Chinese with English abstract).
- WANG Kai-lin, ZHAO Kai, LI Hai-tao, ZHANG Bao-yun, LI Wen-peng. 2017. Study on wetland extraction based on the synthetic identification method in the Baiyangdian Wetland, Hebei Province[J]. Geoscience, 31(6): 1294-1300(in Chinese with English abstract).
- WANG Xiu-yan. 2011. Study on relationship between surface water and groundwater of Baiyangdian Wetland System[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhao-hua, WANG Zi-lu, QIAO Guang-jian. 2011. Analysis of importance of Inter-Basin Water Diversion to restoration of ecological environment of Baiyangdian Lake[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 9(3): 138-141(in Chinese with English abstract).
- XU Wei-hua, OUYANG Zhi-yun, IRISVAN D, ZHENG Hua, WANG Xiao-ke, MIAO Hong, CAO Quan-hu. 2005. Reed land change and its relationship to water level in Baiyangdian Lake since 1987[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 19(4): 181-184, 189(in Chinese with English abstract).
- YANG Chun-xiao. 2010. Analysis on the deposited quantity variation and its influenced in Baiyangdian[J]. Ground Water, 32(2): 110-112(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Dong-jiang, HA Jian-qiang, SHI Hong-fei. 2014. Analysis of variation of flow into Baiyangdian Lake[J]. Water Resources Protection, 30(1): 43-47(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Gan-nian. 2013. Research of the eco-compensation of water supplement for Baiyangdian Wetland[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Su-zhen, MA Jing, LI Bao-gui. 2007. The ecological problems and sustainable development countermeasures of the Baiyangdian Wetland[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 5(4): 53-56(in Chinese with English abstract).