

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0055

严登明,李蒙,翁白莎,等.卧龙湖水量平衡分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):16-22. YAN D M, LI M, WENG B S, et al. Water balance in the Wolong Lake[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 16-22. (in Chinese)

卧龙湖水量平衡分析

严登明^{1,2}, 李蒙², 翁白莎², 宋新山¹, 杨裕恒², 马骏³

(1. 东华大学 环境科学与工程学院 国家环境保护纺织污染防治工程技术中心, 上海 201620;

2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038; 3. 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056000)

摘要:强人类活动影响下缺资料平原区内陆湖泊的水量平衡研究一直是个难题。以平原区内陆湖泊卧龙湖为研究区,构建了分布式水文模型并分析水量平衡关系。模型模拟结果纳什系数大于0.75,径流相对误差均小于3%,模拟效果良好。通过对丰、平、枯、特枯等典型年的水量平衡进行分析,结果表明:在天然情况下,卧龙湖丰水年、平水年、枯水年以及特枯水年湖泊蓄变量分别为20 441.97万、7 911.09万、1 654.98万、687.05万 m³。考虑上游截留后,丰水年湖泊蓄变量为15 424.78万 m³,平水年湖泊蓄变量为1 943.47万 m³,枯水年和特枯年东西马莲河出现断流情况,导致湖泊在枯水年、特枯年极度缺水。

关键词:平原区;湖泊;水文模型;水量平衡

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Water balance in the Wolong Lake

YAN Dengming^{1,2}, LI Meng², WENG Baisha², SONG Xinshan¹, YANG Yuheng², MA Jun³

(1. College of Environmental Science and Engineering, State Environmental Protection Engineering Center for Pollution Treatment and Control in Textile Industry, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Hebei University of Engineering, Handan 056000, China)

Abstract: The water balance of lakes in the plain areas is difficult to estimate due to the influences of human activities. In the paper, a distributed hydrological model was constructed and the water balance was calculated for the Wolong Lake, an inland lake in the plain area. The model simulation results had a Nash coefficient being greater than 0.75 and a relative runoff error of being less than 3%. The water balance was further investigated for typical years, such as, wet year, normal year, dry year and extreme dry year. The results showed that under natural conditions, the lake storage were 204.42 million, 79.11 million, 16.55 million, 6.87 million m³, respectively. If water was interrupted in the upstream section, the lake storage would reduce to 154.24 million m³ for wet year, and to 19.43 million m³ for the normal year. Under the dry year and the extreme dry year, there was no flow in the East and West Malian River, causing the lake to be extremely drought.

Key words: plain area; lake; WEP model; water balance

收稿日期:2018-12-04 修回日期:2019-03-06 网络出版时间:2019-03-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190321.1531.019.html>

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0404504)

作者简介:严登明(1989—),男,安徽太湖人,在读博士,主要从事水文与水资源研究。E-mail:18519500795@163.com

通信作者:翁白莎(1986—),女,福建晋江人,高级工程师,博士,主要从事水文与水资源研究。E-mail:baishaweng@163.com

湖泊是地球水文循环的重要组成部分,为人类和生态系统提供各种各样的功能服务^[1-3]。湖泊水量平衡分析和水文特征评价对于区域供水管理和水资源短缺预警具有非常重要的意义^[4-5]。

通常,湖泊水量平衡计算有几类方法,一是利用已有的历史数据,建立水量平衡关系,进行水量平衡计算。如燕华云等^[6]收集了青海湖降水、径流、蒸发、湖泊水位、地下水补给量等数据,研究青海湖水量的动态变化过程;孟万忠等^[7]根据历史的水文、气象资料,应用水量平衡的方法,对太原盆地湖泊的水量进行了估算。二是利用同位素质量平衡方法对湖泊水量进行预估。包为民等^[8]利用稳定同位素质量平衡方法,计算了青海湖多年平均蒸发量和地下水入湖量。三是采用水文模型模拟技术,对湖泊水量平衡的要素进行计算。如徐金涛等^[9]采用参数较少的 SCS 模型计算了抚仙湖集水流域地表径流量;董春雨等^[10]运用改进的水热平衡模型预测了 2050 年以前青海湖逐年的湖面蒸发量。

强人类活动会改变区域水文循环并随后改变湖泊水量和水质^[11-12]。由于湖泊水量变化受到强人类活动的影响,有必要研究自然和人类的耦合效应对湖泊水量平衡的影响^[13]。对于强人类活动影响下缺资料平原区水文模型构建相当困难。首先是平原区流域边界的确定以及水系生成问题,平原区地势平缓,通过 GIS 提取山脊线不是很准确;其次是对模型精度的判断,需要实测数据进行校验,缺资料地区的模型校验难度很大;还有受到强人类活动影响上下游截留量如何确定;最后是平原湖泊面积对蒸发量影响很大,如何精确的确定湖泊面积值得商榷。

本研究以卧龙湖为研究对象,对强人类活动影响下缺资料平原内陆湖泊水量平衡分析存在的难点进行探索性研究。以 WEP (water and energy transfer process) 模型为主要研究手段,对卧龙湖入湖地表径流量和地下水补给量进行估算。通过对遥感影像数据进行勾画,计算湖泊水面面积。最后,重点开展生态水文过程模拟及水量平衡分析,为卧龙湖恢复生态蓄水量、抵御科尔沁沙漠南侵以及改善湿地生态功能、恢复生物多样性提供技术支撑。

1 研究区概况

卧龙湖地处中国东北平原康平县境内(图 1),属于干旱区内陆湖泊,具有重要的生态服务功能^[14-15]。康平县地处辽宁省最北部,属沈阳市辖县。地理位置处于北纬 $42^{\circ}31' \sim 43^{\circ}02'$,东经 $122^{\circ}45' \sim 123^{\circ}37'$,东隔辽河与铁岭市昌图县相望,西邻阜新市彰武县,南接法库县,北与内蒙古科尔沁左翼后旗

毗邻。卧龙湖常规的水文观测不足,并且受到内蒙古地区大量灌区的影响,其上游来水量估算显得更加困难。长期以来,紧缺的水资源背景和区域突出的竞争性用水矛盾,湖泊来水被严重挤占;加之气候变化背景下区域干旱事件发生的频度和强度加剧^[16-17],湖泊生态需水长期得不到满足,已出现逆行的生态演替,生态服务功能严重退化,危及到辽西北地区整体生态安全^[20]。

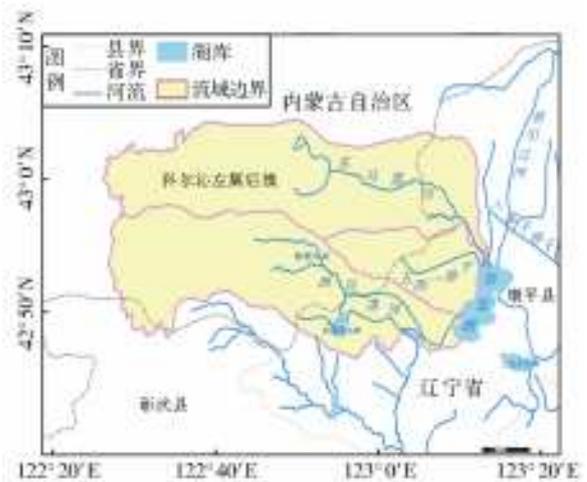


图 1 卧龙湖流域地理位置

Fig. 1 Location of the Wolong Lake basin

2 数据和方法

2.1 水系修正及集水区边界确定

由于卧龙湖在平原区,地势平缓,水系以小河、人工河渠为主,为卧龙湖的水系划分以及流域边界确定造成一定的干扰。现有资料对于卧龙湖流域面积说法不一,且难以获取精准的流域面积图。本研究通过实地考察、资料查询、水文技术以及专家咨询等方法对卧龙湖水系和边界进行梳理和确定。首先,利用 GIS 技术,采用 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的 DEM,生成子流域,在 Google Earth 中对子流域及其水系和边界进行了校对;其次将校对结果向当地专家进行咨询;最终确定卧龙湖流域面积为 $1\,729.2\text{ km}^2$ 。

2.2 分布式水文模型构建

卧龙湖流域处于资料缺乏地区,流域内主要河流东西马莲河没有设置监测站点,同时,卧龙湖流域特殊的下垫面条件和复杂的水文情势,对模型提出了更高的要求。因此,本研究用由中国水利水电科学研究院贾仰文教授自主研发的 WEP (water and energy transfer process) 模型进行水量平衡模拟^[22-24]。为了解决东、西马莲河缺少水文监测数据校验的问题,将模拟区域扩大到福德店和通江口区

间(图 2),采用上述两个水文站的还原径流量监测数据进行率定和验证。在构建模型的过程中,以卧龙湖主要入湖河渠所在集水区作为模型的子流域单元,其中东马莲河集水区、西马莲河集水区、五四一排干集水区为卧龙湖的上游集水区,二道河集水区作为模型校验子流域单元。

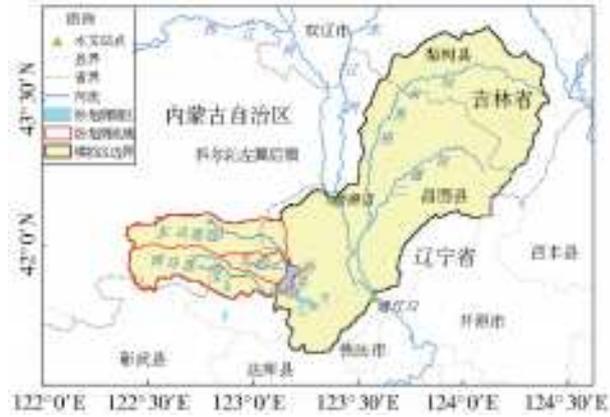


图 2 水文模型模拟区
Fig. 2 Hydrological simulation areas

2.3 研究数据

2.3.1 模型输入以及校验数据

WEP 水文模型模拟过程中共采用了 6 大类数据,即数字高程信息、土壤信息、土地利用信息、气象水文信息、水利工程信息和社会经济及供用水信息,详见表 1。各种类型数据通过空间插值和格式化处理后,作为模型的输入数据。水文模型校验数据采用的是通江口和福德店两个水文站 1973—2013 年逐日还原径流数据。

2.3.2 湖泊水量平衡数据

湖面降水数据采用 1956—2016 年康平气象站点的逐日降水数据。湖面蒸发数据采用 1956—2016 年康平气象站点的逐日蒸发数据。利用 Landsat7 和 Landsat8 遥感影像数据提取 1994—2018 年湖泊逐月水面面积,作为典型年计算入湖降水量和蒸发量的水面面积。采用《2015 年内蒙古统计年鉴》中灌区面积数据对卧龙湖上游灌区面积进行校核。

表 1 模型输入数据及其主要来源
Tab. 1 Model input and their sources

序号	数据类型	数据名称	数据来源
1	数字高程信息	高程、坡度、坡向、流向、汇流累计数、数字河网、汇流计算顺序、集水区	1:25 万国家基础地理信息系统中的地形数据 30 m×30 m 全国基础地理信息数据 全国第二次土壤普查数据
2	土壤信息	土壤厚度、土壤质地等	中国土壤数据库 1:5 万康平县土壤类型分布图
3	土地利用信息	1985、1995、2005 和 2014 年土地利用数据	全国土地利用数据
4	气象水文信息	降水量、风速、气温、日照时数、相对湿度 日径流量	康平及周边 4 个气象站 1961—2016 年日实测值 福德店、通江口 2 个水文站 1961—2013 年逐日实测径流量
5	水利工程信息	水库、灌区分布	2016 年全国第二次水利普查数据
6	社会经济及供用水信息	2006 年供、用、耗水数据	2006 年全国水资源综合规划 1990—2016 年沈阳、辽宁、内蒙等水资源公报

2.4 模型校验

WEP 模型将卧龙湖流域划分为 5 个集水区,以日为时间步长,首先进行了 1961—2016 年共 56 a 历史气象水文系列及相应下垫面条件下的连续模拟计算。其中 1961—1966 年作为模型的预热期,1967—2002 年作为模型的率定期,主要率定参数包括土壤饱和导水系数、地下水含水层的传导系数及给水度、河床材料透水系数、Manning 糙率系数以及各类土地利用的洼地最大截留深等。

模型率定后,保持所有模型参数不变,对 2003—2013 年共 11 a 的连续模拟结果进行验证。从验证结果来看,2003—2013 年流域多年平均径流量模拟

误差在 3% 以内,模型月过程纳什效率系数整体在 0.75 以上,月径流过程拟合较好(表 2 和图 3)。总体上,模型模拟精度较高,各指标均达到了许可要求。

3 结果与讨论

3.1 模型校验以及上游天然来水量计算

3.1.1 上游天然来水量计算

卧龙湖地表径流补给主要有东、西马莲河以及五四一排干,根据 1977—2016 年长系列径流模拟数据分析丰、平、枯、特枯等典型年份各子流域地表径流补给量(表 3)。丰水年地表径流补给量为 23 980.10 万 m³,平水年入湖补给量为 10 457.38

表 2 流域径流模拟校验结果

Tab. 2 Simulation results

水文站	实测径流量 年均值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	模拟径流量 年均值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	偏差/%	月径流过程 纳什效率系数	相关系数
(福德店—通江口)	106.82	109.34	-2.30	0.782	0.892

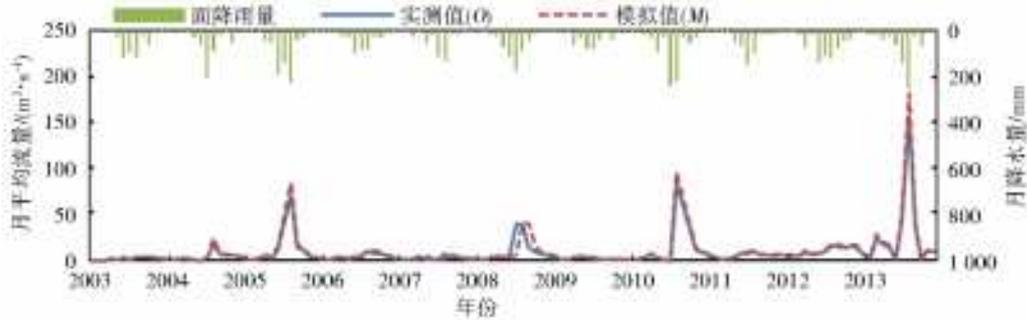


图 3 实测月径流校验结果

Fig. 3 Comparison of simulated runoff with observations

表 3 各子流域地表径流量

Tab. 3 Surface runoff of each sub-basin

单位:万 m^3

子流域	丰水年	平水年	枯水年	特枯水年	多年平均
东马莲河	10 439.29	3 950.16	1 650.11	404.93	3 825.01
西马莲河	12 003.28	5 864.32	1 748.31	454.62	4 241.17
五四一排干	1 537.53	642.90	312.55	115.41	664.41
合计	23 980.10	10 457.38	3 710.97	974.96	8 730.59

万 m^3 , 枯水年入湖补给量为 3 710.97 万 m^3 , 特枯年入湖补给量为 974.96 万 m^3 , 多年平均入湖补给量为 8 730.59 万 m^3 。

3.1.2 地下水补给

根据模型模拟数据分析丰、平、枯、特枯等典型年份各子流域地下水补给量(表 7)。丰水年、平水年、枯水年和特枯年地下水入湖补给量分别为 604.81 万、427.09 万、378.81 万和 148.56 万 m^3 , 多年平均入湖补给量为 294.53 万 m^3 。

3.2 上游截留量计算

卧龙湖流域上游分布有灌区,沿河灌区主要从东、西马莲河取水,同时,西马莲河上游修建有散都水库,故卧龙湖实际入湖量应扣掉上游截留量。

根据 Google Earth 卫星地图,细致勾画卧龙湖流域位于科尔沁左翼后旗内的灌区,通过 ArcGIS 平台,计算灌区总面积(图 4),然后根据《2015 年内蒙古统计年鉴》数据,对上游灌区面积计算结果进行复核,最终确定卧龙湖流域上游灌区面积为 246.53 km^2 。

根据《内蒙古自治区地方标准 DB 15/T 385—2009》《辽宁省行业用水定额 DB 21/T 1237—2015》,农作物灌溉定额见表 4。由此计算灌区在丰、平、枯、特枯等典型年份的灌溉量,即截留量(表

5);最后,通过天然情况下入湖量和截留量计算上游截留后入湖量(表 6)。



图 4 Google Earth 勾画灌区面积

Fig. 4 Irrigation areas from Google Earth

表 4 农作物灌溉定额

Tab. 4 Crop irrigation quota

单位: m^3/hm^2

典型年		丰水年	平水年	枯水年	特枯水年
内蒙古	玉米	1 900	2 400	3 200	3 900
	水稻	7 800	8 000	8 300	8 500
辽宁	玉米	650	825	1 575	2 025
	水稻	4 900	5 055	6 225	7 425

表 5 典型年子流域上游截留量

Tab. 5 Typical annual sub-basin interruption

子流域	单位:万 m ³				
	丰水年	平水年	枯水年	特枯年	多年平均
东马莲河	1 825.63	2 196.61	2 788.98	3 303.62	2 528.71
西马莲河	2 855.32	3 382.72	4 224.16	4 952.85	3 853.76
五四一排干	630.94	764.13	1 403.31	1 774.23	1 143.15
总截留量	5 311.89	6 343.46	8 416.45	10 030.70	7 525.62

表 6 典型年子流域截留后入湖量

Tab. 6 Streamflow after interruption in typical sub-basins

子流域	单位:万 m ³				
	丰水年	平水年	枯水年	特枯年	多年平均
东马莲河	8 613.66	1 753.55	0	0	1 228.16
西马莲河	9 147.96	2 481.60	0	0	0
五四一排干	1 201.29	254.61	0	0	252.62
截留后入湖水量	18 962.91	4 489.76	0	0	1 480.78

考虑上游截留后,丰水年实际入湖量为 18 962.91 万 m³,平水年实际入湖量为 4 489.76 万 m³,枯水年和特枯年实际入湖量基本为 0,多年平均实际入湖量为 1 480.78 万 m³。

3.3 湖面降水及蒸发量计算

3.3.1 湖面面积的确定

根据下载 1994—2018 年逐月遥感数据,利用 ENVI 勾画卧龙湖的湖面影像,然后在 GIS 中计算其面积,将每年逐月面积的平均值作为当年湖面面积。最终确定 1994—2018 年逐年卧龙湖湖面面积,计算得到卧龙湖多年平均湖面面积为 41.18 km²。

3.3.2 湖区降水量计算

根据 1956—2016 年卧龙湖流域长系列降水数据进行排频,并得出 25%、50%、75%、95% 频率下的降水量分别为 614.5 mm、508.9 mm、434.7 mm、333.3 mm。由降水量选出 1956—2016 年近 61 a 的丰、平、枯、特枯典型年分别为 1994、2011、2007、2002 年。根据丰、平、枯、特枯等典型年的降水情况

以及湖面面积,计算湖区降水量。其中,丰、平、枯、特枯等典型年份的湖面面积分别为 57.11、41.62、24.62、3.86 km²。由此可得,丰水年、平水年、枯水年和特枯年湖区降水量分别为 3 509.41 万、2 118.04 万、1 078.60 万和 128.65 万 m³,多年平均降水量为 2 727.14 万 m³(表 7)。

3.3.3 湖区蒸发量计算

根据长系列蒸发数据以及对应年份湖面面积计算湖区蒸发量,计算结果表明,丰水年、平水年、枯水年和特枯年湖面蒸发量分别为 7 652.35 万、5 091.42 万、3 513.40 万和 565.11 万 m³,多年平均湖面蒸发量为 5 271.16 万 m³(表 7)。

3.4 湖泊水量平衡分析

卧龙湖来水量主要包括湖面降水、地表径流入湖补给和地下水入湖补给三部分;耗水量主要是湖区水面蒸发损失和渗漏损失。

卧龙湖湖底 1~2 m 以下为沙质岩,透水性较差,又常年处于饱和状态,所以渗漏对卧龙湖水量影响不明显,因此不考虑渗漏的影响^[25]。

卧龙湖水量平衡方程为

$$E_{\text{湖}} = P + R_g + R_s \pm \Delta W \quad (1)$$

式中: $E_{\text{湖}}$ 为湖水面蒸发量(mm); P 为湖面降水量(mm); R_s 为地表水入湖补给量(m³); R_g 为地下水入湖补给量(m³); ΔW 为湖水储量变量(m³)。

在计算卧龙湖湖泊蓄变量中,分天然和上游截留两种情况分析了卧龙湖的水量平衡关系(表 7)。在天然情况下,丰水年、平水年、枯水年和特枯年湖泊蓄变量分别为 20 441.97 万、7 911.10 万、1 654.98 万和 687.06 万 m³,多年平均湖泊蓄变量为 6 481.09 万 m³。考虑上游截留后,丰水年湖泊蓄变量为 15 424.78 万 m³,平水年湖泊蓄变量为 1 943.47 万 m³,枯水年和特枯年上游没有来水,导致湖泊在枯水年、特枯年极度缺水。

表 7 典型年湖泊水量平衡

Tab. 7 Water balance of the lake in typical years

典型年	单位:万 m ³				
	丰水年	平水年	枯水年	特枯年	多年平均
降水量	3 509.41	2 118.04	1 078.60	128.65	2 727.14
天然地表径流量	23 980.10	10 457.38	3 710.97	974.95	8 730.59
实际地表径流量	18 962.91	4 489.76	0	0	1 480.78
地下水补给量	604.81	427.09	378.81	148.56	294.53
蒸发量	7 652.35	5 091.42	3 513.40	565.11	5 271.16
天然情况湖泊蓄变量	20 441.97	7 911.09	1 654.98	687.05	6 481.09
实际湖泊蓄变量	15 424.78	1 943.47	-2 055.99	-287.90	-768.71

4 结 论

本文以平原区内陆湖泊卧龙湖为例,构建了分布式水文模型并分析了水量平衡关系。相对于以往同类研究,本文改进了水文模拟及湖泊蒸发量估算方法,尝试在强人类活动影响下分析干旱区湖泊水量平衡情况,为该地区的水量平衡模拟提供有效验证数据,并对卧龙湖生态环境保护提供参考依据。通过研究结果分析得出以下结论。

(1)卧龙湖丰水年、平水年、枯水年以及特枯水年地表径流补给量分别为23 980.10万、10 457.38万、3 710.97万、974.96万 m^3 ;地下水入湖补给量分别为604.81万、427.09万、378.81万和148.56万 m^3 。

(2)在考虑上游截留的情况下,卧龙湖丰水年、平水年的实际入湖量分别为18 962.91万、4 489.76万 m^3 ,枯水年和特枯年实际入湖量基本为0。

(3)在水量平衡计算过程中,在天然情况下,卧龙湖丰水年、平水年、枯水年以及特枯水年湖泊蓄变量分别为20 441.97万、7 911.09万、1 654.98万、687.05万 m^3 。在考虑截留的情况下,卧龙湖平水年湖泊蓄变量为1 943.47万 m^3 ,枯水年和特枯年,上游没有来水,出现断流的情况。

参考文献(References):

[1] KUMMU M, TES S, YIN S, et al. Water balance analysis for the Tonle Sap Lake-floodplain system[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(4): 1722-1733. DOI: 10.1002/hyp.9718.

[2] ZHANG Q, DONG X, CHEN Y, et al. Hydrological alterations as the major driver on environmental change in a floodplain Lake Poyang (China): Evidence from monitoring and sediment records[J]. Journal of Great Lakes Research, 2018; S0380133018300212. DOI: 10.1016/j.jglr.2018.02.003.

[3] LI Y, ZHANG Q, YAO J, et al. Hydrodynamic and hydrological modeling of the Poyang Lake catchment system in China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(3): 607-616. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000835.

[4] XU L, ZHU M, HE B, et al. Analysis of water balance in Poyang Lake basin and subsequent response to climate change[J]. Journal of Coastal Research, 2014, 68: 136-143. DOI: 10.2112/SI68-018.1.

[5] YE X, ZHANG Q, LIU J, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment,

China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 494(12): 83-95. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.04.036.

- [6] 燕华云,贾绍凤.青海湖水量平衡分析与水资源优化配置研究[J].湖泊科学,2003,15(1):35-40. (YAN H Y, JIA S F. Water balance analysis and optimal allocation of water resources in Qinghai Lake[J]. Lake Science, 2003, 15(1): 35-40. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1003-5427.2003.01.005
- [7] 孟万忠,刘晓峰,王尚义.两千年来太原盆地古湖泊的水量平衡研究[J].干旱区资源与环境,2011,25(8):167-171. (MENG W Z, LIU X F, WANG S Y. Study on water balance of Ancient Lakes in Taiyuan basin in the past two thousand years[J]. Resources and Environment in Arid Areas, 2011, 25(8): 167-171. (in Chinese))
- [8] 包为民,胡海英,瞿思敏,等.稳定同位素方法在湖泊水量平衡研究中的应用[J].人民黄河,2007,29(8):29-30. (BAO W M, HU H Y, YAN S M, et al. Application of stable isotope method in lake water balance study[J]. Yellow River, 2007, 29(8): 29-30. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2007.08.014.
- [9] 徐金涛,张奇,徐力刚.抚仙湖集水域地表径流入湖水量模拟[J].湖泊科学,2007,19(6):718-726. (XU J T, ZHANG Q, XU L G. Simulation of surface water inflow into the Lake in the waters of Fuxian Lake[J]. Journal of Lake Science, 2007, 19(6): 718-726. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1003-5427.2007.06.015.
- [10] 董春雨,王乃昂,李卓仑,等.基于水热平衡模型的青海湖水位变化趋势预测[J].湖泊科学,2009,21(4):587-593. (DONG C Y, WANG N A, LI Z L, et al. Prediction of water level change in Qinghai Lake based on hydrothermal equilibrium model[J]. Journal of Lake Science, 2009, 21(4): 587-593. (in chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1003-5427.2009.04.019.
- [11] AL-KALBANI M S, PRICE M F, O HIGGINS T, et al. Integrated environmental assessment to explore water resources management in Al Jabal Al Akhdar, Sultanate of Oman[J]. Regional Environmental Change, 2016, 16(5):1-17. DOI: 10.1007/s10113-015-0864-4.
- [12] SHILONG P, PHILIPPE C, YAO H, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467(7311): 43-51. DOI: 10.1038/nature09364.
- [13] CAI Y, SUN G, GUO Z, et al. Simulation for Influence of climate change on the streamflow variation in Poyang Lake basin[J]. Resources Science, 2009, 31(5): 743-749.
- [14] 王丽耀,王洪禄,刘扬,等.卧龙湖湿地生态系统服务价值评价[J].黑龙江科技信息,2010(16):272.

- (WANG L Y, WANG H L, LIU Y, et al. Evaluation of ecosystem service value of Wolong Lake wetland [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2010, 16: 272. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-1328. 2010. 16. 274.
- [15] 郑红, 武祎. 卧龙湖湿地生态系统服务功能价值评估 [J]. 吉林水利, 2015(9): 24-27. (ZHENG H, WU Y. Evaluation of the service function value of Wolong Lake wetland ecosystem [J]. Jilin Water Resources, 2015(9): 24-27. (in Chinese))
- [16] DAI A. Drought under global warming: A review [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change, 2011, 2(1): 45-65. DOI: urn: issn: 1757-7780.
- [17] FIELD C B, BARROS V, STOCKER T F, et al. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special report of the Intergovernmental Panel on climate change. [J]. Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 2012, 18 (6): 586-599. DOI: 10. 1017/CBO9781139177245.
- [18] NI Q W, WANG Y, ZHENG B H, et al. Judgment on degradation of Wolonghu wetlands based on catastrophe theory model [J]. Wetland Science, 2014, 12(1): 1-6.
- [19] 沈阳市水利基础信息集 [M]. 长春: 东北大学出版社, 2014. (Shenyang Water Conservancy Basic Information Set [M]. Changchun: Northeastern University Press, 2014. (in Chinese))
- [20] 张建军, 刘春涛, 李璐. 基于行动导向的河湖生态区保护与利用规划——当前主要问题与沈阳经验 [C]. 海口: 2014 中国城市规划年会, 2014. (ZHANG J J, LIU C T, LI L. Action-oriented protection and utilization planning of rivers and lakes ecological zone: Current main problems and Shenyang experience [C]. Haikou: 2014 China Urban Planning Annual Conference, 2014. (in Chinese))
- [21] 赵洪利, 杨云飞, 董立国. 沈阳卧龙湖省级自然保护区湿地现状与生态功能利用探讨 [J]. 环境保护科学, 2008, 34(4): 40-43. (ZHAO H L, YANG Y F, DONG L G. Discussion on wetland status and ecological function utilization in Shenyang Wolong Lake provincial nature reserve [J]. Environmental Science, 2008, 34(4): 40-43. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-6216. 2008. 04. 013.
- [22] 贾仰文, 王浩, 王建华, 等. 黄河流域分布式水文模型开发和验证 [J]. 自然资源学报. 2005, 20(2): 300-308. (JIA Y W, WANG H, WANG J H, et al. Development and verification of distributed hydrological model in the Yellow River basin [J]. Journal of natural resources, 2005, 20(2): 300-308. (in Chinese))
- [23] 贾仰文. WEP 模型的开发与分布式流域水循环模拟 [C]. 深圳: 中国水利学会 2003 学术年会, 2003. (JIA Y W. Shenzhen: Development of WEP model and simulation of distributed watershed water cycle [C]. Shenzhen: 2003 Annual Conference of China Water Conservancy Society, 2003. (in Chinese))
- [24] 贾仰文. 分布式流域水文模型原理与实践 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (JIA Y W. Principles and practices of distributed watershed hydrological models [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2005. (in Chinese))
- [25] 李德富, 王铁良, 苏芳莉, 等. 卧龙湖湿地水量平衡模型 [J]. 人民长江, 2009, 40(15): 24-25. (LI D F, WANG T L, SU F L, et al. Water balance model of Wolong Lake wetland [J]. People's Yangtze River, 2009, 40(15): 24-25. (in Chinese)). DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-4179. 2009. 15. 009.