

基于生态水文学原理的湖泊最小生态需水量计算

崔保山, 赵 翔, 杨志峰*

(北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

摘要:近几十年来, 由于人类活动的加剧以及全球气候的变化, 湖泊普遍出现了萎缩、水位下降、水量锐减、湖水盐化、水质污染、富营养化、甚至干涸消亡等状况。确保湖泊生态系统必需的最小水量是解决可能出现的湖泊严重水资源和生态系统危机的区域问题之一。从生态水文学原理出发, 对湖泊最小生态需水量的概念进行了探讨, 并提出了计算最小生态需水量的 3 种方法: ①曲线相关法; ②功能法; ③最低生态水位法。在最低生态水位法中, 其方法有最低年平均水位法和年保证率设定法。一旦湖泊最小生态需水量得以确定, 将为水资源管理部门的水资源合理配置和湖泊管理提供综合性、权威性及可操作性决策依据, 为退化湖泊生态系统的恢复与重建提供科学基础。

关键词:湖泊; 最小生态需水量; 计算方法; 生态水文学

文章编号:1000-0933(2005)07-1788-08 **中图分类号:**P344, Q141 **文献标识码:**A

Eco-hydrology-based calculation of the minimum ecological water requirement for lakes

CUI Bao-Shan, ZHAO Xiang, YANG Zhi-Feng* (*School of Environment, State Key Laboratory of Water Environmental Simulation, Key Laboratory for Water and Sediment Sciences Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1788~1795.

Abstract: In the past several decades, people unilaterally emphasize the exploitation of lakes and ignore the fragility of the ecosystems. A large quantity of unreasonable exploitation activities have emerged, such as land reclamation surrounding lakes, serious loss of the vegetation, irrational building of the hydraulic engineering, insufficient water allocation for ecological purpose in the water resources planning, discharge of the waste water from industry and agriculture, and so on. Therefore, lakes have been facing a number of disadvantageous eco-environmental issues due to the aggravation of human activities and the global climate change, such as shrinkage of areas, descent of water level, reduction of water quantity, salinization of lakes, water pollution, water eutrophication, dried-up and die out of lakes, etc.

The minimum ecological water requirement is the necessary water demand to keep lake ecosystems harmonious and stable. The decrease of the ecological water demand will affect the dynamic equilibrium of the lake ecosystems and the normal exertion of its function. Therefore, The guarantee of the minimum ecological water requirement is necessary to solve problems about serious water shortage and crisis of eco-environmental systems in the lakes. According to the principles of eco-hydrology, this paper inquires into the concept about the minimum ecological water requirement of lakes, and puts forward the following calculation methods: a), curvilinear correlation method; b), function method; c), the lowest ecological water level method. Curvilinear correlation method makes use of the correlation of the water and its ecological function to determine the minimum ecological water demand of the lake ecosystems; its assumption is that is the critical value of the water ecological demand the

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(2003CB415104); 国家自然科学基金重点资助项目(50239020)

收稿日期:2005-03-14; **修订日期:**2005-06-03

作者简介:崔保山(1967~), 男, 河北沽源人, 教授, 从事水资源与水环境、湿地生态环境需水研究。

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zfyang@bnu.edu.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 50239020); Development Plan of the State Key Fundamental Research of China (No. 2003CB415104)

Received date: 2005-03-14; **Accepted date:** 2005-06-03

Biography: CUI Bao-Shan, Professor, mainly engaged in water resource and water environment, eco-environmental water requirement of wetlands.

water quantity when a catastrophe occurs in the lake ecosystems. For the function method, the minimum ecological water demand is determined based on the function of water resource and quantity of water. The function method is based on the theory of ecology, hydrology, zoology and botany. For the lowest ecological water level method, the minimum ecological water demand is determined based on the correlation of lake area and water level, and determination of the lowest ecological water level is the key factor for this method. This paper puts forward two methods from the view of eco-hydrology. They are the lowest annual average water level method and annual guaranteed frequency method. Finally, this paper compares the different calculation methods and analyzes the advantages and disadvantages of each method as well as its suitable objects. Once the minimum ecological water requirement of a lake is determined, it will provide omnibus, authentic and operational decision-making support for water resources department to manage, plan and allocate water resources. It will also provide scientific basis for the rehabilitation and restoration of the degraded lake ecosystems.

Key words: lakes; the minimum ecological water requirement; calculating method; eco-hydrology

湖泊是地表水资源的重要组成部分,是湖泊流域地区经济持续发展和人们赖以生存的基础。湖泊生态系统又是水域生态系统中的静水生态系统,它是湖盆、湖水、水体性质和水生生物组成的综合体,处于不断发展中的湖泊,或因区域自然生态环境的差异,或是成因和发展阶段的不同,湖泊的物理、化学和生物过程的区域特点的不同,形成了湖泊生态系统的多样性和空间分布的多样性^[1,2]。然而,在相当长的一段时期里,由于人们片面强调对湖泊的开发利用而忽略了其本身生态系统脆弱性的一面,诸如围湖造田、流域植被严重破坏、影响湖泊水情变化的大中型水利工程的盲目建设以及工农业大量废水排放等不合理开发利用活动,从而导致湖泊干枯萎缩、富营养化、水质盐化及水体污染等,改变了水文动力状况和水文循环形式,降低了湖泊生物多样性,甚至一些湖泊已完全退化,给湖区的居民生产和生活造成了巨大的损失,影响了社会经济的可持续发展。因此,保护湖泊环境、维持湖泊水资源功能及恢复和重建已遭破坏的生态系统备受各国环境专家及管理部门的关注。

最小生态需水量是维持湖泊系统和谐与稳定所必须消耗的水分,生态需水量的减少,将直接影响到湖泊生态系统的动态平衡及其功能的正常发挥(图 1)。因而,湖泊生态需水问题是当前生态学和水文学研究的热点问题之一。Rashin 等^[3]提出,为了保证水资源的可持续利用,首先应满足湖泊生态系统对水量的需求,但作者并没有给出明确的概念和计算方法。Baird 等^[4]针对湖泊的基本结构和功能,较详细地分析了植物与水文过程的相互关系,强调了水作为环境因子对自然保护和恢复所起到的重要作用。David 等^[5]认为,如果湖泊水量低于某一个量时,将会导致其生态系统结构的破坏及功能的丧失,为了最大程度地实现湖泊的生态价值,必须满足它本身所需要的水量。Ngana 等^[6]提出保证一定水量来维持湖泊生态系统的需要,就是为了保证社会经济和生态环境协调发展。

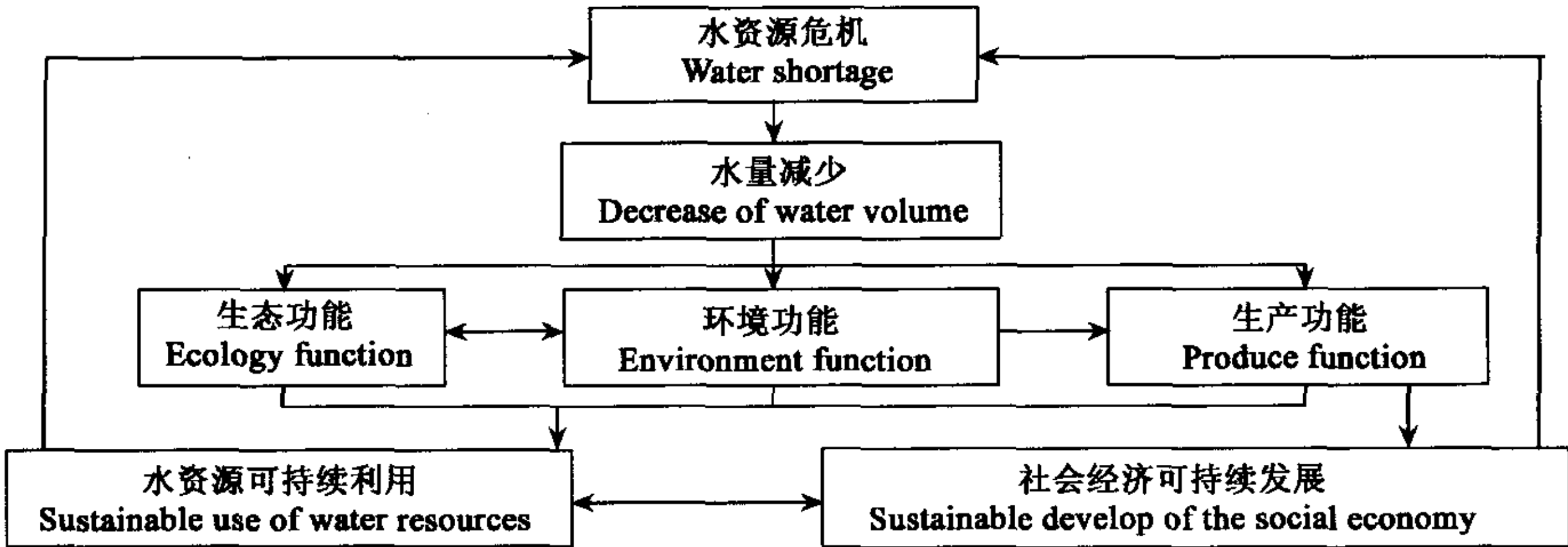


图 1 湖泊水量与水资源功能关系

Fig. 1 Relationship between water quantity and water function for lakes

目前,国内已经有很多学者就湖泊生态需水的基本概念、计算方法等问题^[7~17]进行了研究,取得了一些成果。本文从生态水文学角度,讨论了湖泊最小生态需水的概念及其计算方法。

1 湖泊最小生态需水量的界定

根据生态学上的耐受性定律^[18,19]:每一种环境因子都有一个生态上的适应范围大小,称之为生态幅。即有一个最低和最高点,两者之间的幅度为耐性限度。因此,作为湖泊主要生态因子之一的水量,应在一个合理的范围之内,即有一个最高、最适和最低 3 个基点。其上限是湖泊最大生态需水量,超过此值,一方面,湖泊将水漫堤岸,由此可能发生洪涝灾害,严重威胁周边地区生命财产安全;另一方面,将会影响湖泊生态系统的健康发展,如湖泊在最大水位运行期间在一定程度上因植物根系缺氧、室

息、烂根等而影响它们的生长发育。下限是湖泊最小生态需水量,低于此值,湖泊生态系统结构与功能将会受到一定程度的损害。只有当水量处于最适范围内,才能保证生物有最优的生长条件,以维持湖泊系统的动态平衡。

李比希^[18]在研究植物生理时发现“植物生长取决于处在最小量状况下的营养物质的量”,或者说,当植物所需的营养物质降低到该植物的最小需要量时,该营养物质就会影响该植物的生长。这个论点就是人们常说的李比希最小因子定律。在生态平衡概念中指出^[18,19]：“当外来干扰超越生态系统自我调节能力,而不能恢复到原初状态谓之生态失调,或生态平衡的破坏”。基于上述概念,可以认为湖泊最小生态需水量是指为保证特定发展阶段的湖泊生态系统结构的稳定,保护生物多样性以及确保湖泊水资源功能正常发挥所必需的、一定质量的最小水量。主要包括湖泊生物最小需水量、蒸散发最小需水量、水生生物栖息地最小需水量、污染物稀释最小需水量、防止湖水盐化最小需水量、航运最小需水量以及景观建设和保护最小需水量等方面。从生态水文学水分平衡原理^[20]角度来分析,湖泊最小生态需水量可用如下函数来表示:

$$W_{\min} = F(V_p, V_{rs}, V_{rq}, \Delta V, V'_{rs}, V'_{rq}, q, \xi) \quad (1)$$

式中, $W_{\min}$ 为时段内的湖泊最小生态需水量(m^3); V_p 为时段内湖面上的降水量(m^3); V_{rs} 为时段内进入湖泊的地表径流量(m^3); V_{rq} 为时段内进入湖泊的地下径流量(m^3); ΔV 为时段前湖泊蓄水量(m^3); V'_{rs} 为时段内流出湖泊的地表径流量(m^3); V'_{rq} 为时段内流出湖泊的地下径流量(m^3); q 为时段内国民经济各部门的用水量(m^3); ξ 为修正常数(m^3)。(1)式表明了为维持湖泊系统的动态平衡所必须遵循的水分平衡原理,为探求湖泊最小生态需水量计算方法提供了理论支持。

2 基于生态水文学原理的湖泊最小生态需水计算

面对不断干枯、萎缩和水质污染严重的湖泊生态环境危机和由此造成资源性缺水和水质性缺水严重局面,维持湖泊和水库的合理水位及其水体的自净能力已成为淡水资源科学配置和永续利用的基本保证^①。合理水位的关键问题就是确定湖泊的最小生态需水量,最小生态需水量的确定是基于这样一个基本目标:为保证特定发展阶段的湖泊生态系统结构稳定、发挥湖泊生态系统正常的生态功能和环境功能、维持湖泊生物多样性和生态系统的完整性等而需要的最小水量。也就是说为防止导致湖泊水资源显著危机而需要的最小水量。其研究以下列科学数据为基础:

- (1) 湖泊多年来的生态研究成果;
- (2) 湖泊 GIS 模拟的结果,而 GIS 模型通常用来估计在湖泊水量变化时沿湖区干旱和洪灾时间频度的比例;
- (3) 以历史植物群落结构记录和湖泊水量的变化为基础的本地湿地植物的需水情况;
- (4) 航运船只通航的需要;
- (5) 湖泊多年来的有关水文资料;
- (6) 关于湖泊鱼类和野生动物的利用信息等。

由于不同类型的湖泊生态环境、社会和经济特性的差异较大^[21],以及不同区域的湖泊的结构、水资源功能的不同等,因此确定湖泊最小生态需水量的计算方法会有所不同。

2.1 曲线相关法

按照生态水文学原理^[18~20],水是生物体的组成成分,并直接参与新陈代谢过程,所以生物体必须经常保持水的摄入与排出的动态平衡,才能进行正常的生命活动。而生物对水量具有适应性,当水量发生较大变化时,将会对生物数量和分布产生影响。由此可知,湖泊水量与湖泊生态系统功能之间具有内在的相关性。如将两个随机变量相应取值点绘在图上,点群的分布不在一条直线上,无法用函数的关系来准确地表示,但也不是杂乱无章,无序可循,点群的分布常表现为有规律的带状分布,这种分布趋势可以用某一数学曲线或直线来近似地拟合,两个或两个以上随机变量之间的这种关系,就称之为相关性^[22]。

在确定湖泊最小生态需水量时,根据不同类型的湖泊的具体情况建立生态功能指标体系,将指标历史数据以及相应最小水量输入到模型中,建立水量与所选的生态功能指标相关曲线图(如选择芦苇面积作为湖泊生态功能指标之一,其模拟图见图2)。数学表达式为: $V = F(\alpha, m)$ 。式中, V 为水量, m 为生态功能指标, α 为参数。在此关系线上,一般都存在着一些“拐点”,所谓“拐点”,其实是微分数学上的概念,指的是在该点处的微分为零值的点,也就是说连续曲线上上凹弧与下凹弧的分界点,这在数学上可表示为: $\frac{\partial^2 V}{\partial m^2} = 0$ 。此拐点的意义是:拐点处的水量所对应的湖泊生态功能发生了显著变化,说明该点是湖泊生态需水量的临界值,即该点处的水量对湖泊生态系统的变化极为敏感。由于曲线上的水量是历年最小水量,因此,拐点处的水量应认为是为维持湖泊生态系统的动态平衡所需要的最小水量。基于此,湖泊最小生态需水量的计算公式为:

① 全国人大常委会. 中华人民共和国水污染防治法,第3章第9条
全国人大常委会. 全国生态环境保护纲要,2000

$$V_{\min} = \beta \frac{\sum_{i=1}^n V'_i}{n}$$

(2)

式中, $V_{\min}$ 为最小生态需水量; β 为系数,可根据湖泊水资源功能的危机标准及其湖泊生态管理目标而定,也可用计算机模拟得到; V'_i 为第*i*个拐点时的水量; n 为统计水量数。

最后,根据最大值原则,取所用不同生态功能指标而计算出来的最小生态需水量值中的最大一个作为该湖泊最小生态需水量的标准值。

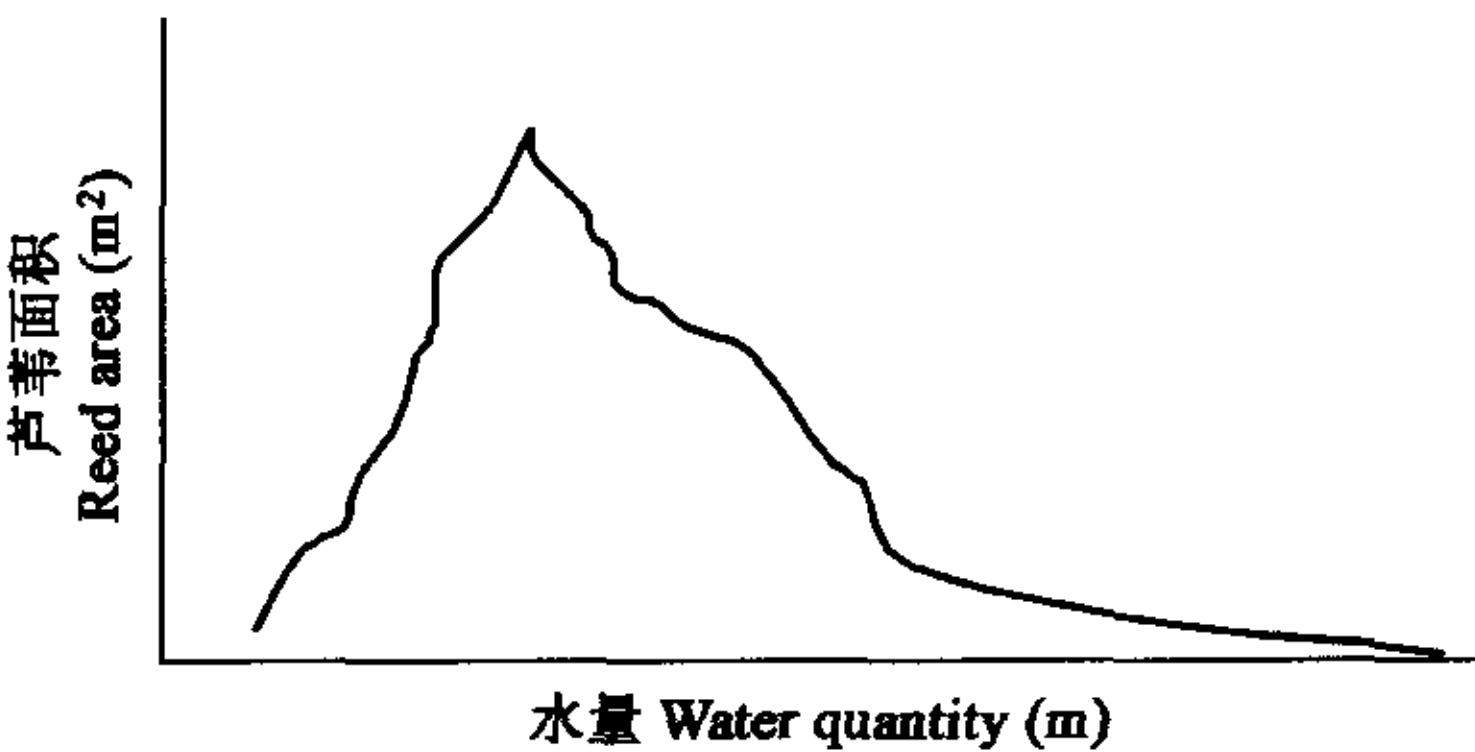


图 2 芦苇面积与水量关系模拟

Fig. 2 Simulation between the reed area and water quantity

2.2 功能法

2.2.1 湖泊水资源功能 水资源既是一种自然资源,又是环境的基本要素。也就是说,从环境科学的角度来看,水资源本身既是资源又是环境^[18]。对于一个湖泊而言,水资源的基本功能可划分为:环境功能、生态功能、生产功能三大功能(表 1)。

表 1 湖泊水资源基本功能分类

Table 1 The classification of water resource basic functions for lakes

类型 Types	主要功能 The main functions
环境功能 Environment function	① 防止湖水盐化 Aviod salinization of water
	② 提供自然生物过滤和营养循环——延缓泥沙和金属的沉淀、碎石和生活垃圾以及来自于降雨、生物分解和土壤氧化而带来的营养物等 Provide percolation of natural biology and nutrition cycle, stay the deposition of the sediment and metal, broken stone, rubbish and the nutrition from rainfall, biology decomposition and soil oxidation
	③ 景观需水 Landscape water demand
	④ 对入湖环境污染的稀释与净化 Dilution and purify for the environmental pollution in lakes
生态功能 Ecology function	① 为保护湖泊食物链、本源及野生生物包括濒危物种的栖息地等提供水文条件 Provide hydro condition to protect the biology chain and the habitat of the fontal and wild biology, including the species be in severe danger
	② 为湖泊水生生物的生长繁殖提供水量 Provide water for the growth and propagation of the hydrobiont in lakes
	③ 在湖泊河口处为维持水中的含盐度及确保动植物群落的生存等提供地面径流 Provide surface runoff to keep the salinity of water and ensure the survival of the community in the outfall of lakes
生产功能 Produce function	① 航运和水上娱乐 Navigation and amusement of water
	② 维持淡水的储蓄和供给 Keep the save and supply of the fresh water
	③ 水力发电 Waterpower electric engineering
	④ 灌溉 Irrigation
	⑤ 调节河川径流、减轻洪涝灾害 Adjust river runoff, alleviate flood disaster
	⑥ 提供工农业生产和城乡居民生活必需的淡水 Supply the necessary fresh water needed by the production of the industry and agriculture and demanded in people's life of the city and town

2.2.2 湖泊水量与水资源功能关系 湖泊水量和水资源功能之间息息相关。湖泊水量的减少将导致湖泊生态环境的变化,而湖泊干涸将对湖泊生态环境造成毁灭性的破坏。当水量减少时,对湖泊水资源功能的影响描述如下:

(1)对湖泊水生生物的影响 湖泊水位的下降将降低水生生物原始的生产率,并导致因陆生林木植被的生长而改变湖泊野生动物的栖息地。外来物种的引入取代了本地植物和改变了湖泊野生动物的数量及分布,按照面积广度,水位的降低和湖泊的过度排水,即湖泊水量在 1a 以上不能达到湖泊最小生态需水量时,很有可能对大面积湿地栖息地比目前营养化所产生的影响更严重:①原生物种生产率的下降。当湖泊水文周期缩短时,主要构成湖泊食物链的物种发生改变,并且每单位面积水生生物生产率随之降低。②湿地植物群落分布和物种相对数量的变化。除了产量减少以外,湖泊沿岸带那些湿生物种被那些陆生物种包括外来物种等所取代(图 3)。由美国 Davis 等^[23]人进行的一项植物研究概括了过去 20a 以上的有关情况,结果表明由于湖泊水量的锐减及水文周期的改变将导致喜湿物种 13%的减少,相应地,在同一时期,鱼雷草(*Torpedo grass*)将有所增加^[23]。③野生动物数量和分布的变化。有关研究表明,湖水位较低时,降低了湖泊为水生生物提供庇护所的功能,同时对鱼类和珍稀鸟类等动物的栖息地环境造成不利影响。

(2)对航运、灌溉、水力发电及水上娱乐的影响 当湖泊因水量减少而经过其船只受到限制时,将影响其航运和水上娱乐。

同时也会直接影响到湖泊的灌溉、水力发电等功能的发挥。

(3)对火灾的影响 周期性的火灾能阻止如茂密型或灌木植被等的生长,有利于维持湖泊生态系统的动态平衡。但是,严重的火灾能消耗泥炭地和破坏湿地植物群落,其对湖泊生态系统造成的不利影响可持续到 30~100a^[23]。生态学家已考察了特旱和火灾对湖泊湿地土壤产生的影响,这种影响直接关系到植物和野生动物的生存与否^[24~29]。而湖泊水位、地表面有机质层厚度、干湿的季节变易都会影响火的严重性、速度和扩展幅度。据 Cornwell 等^[30]报道:在正常水文周期循环期间发生的湖泊湿地火灾,如果水位低于地面 0.45~0.61m 时,其对湖泊生态系统影响较小;当水位低于地面 1.2~1.5m,将促使泥炭地干化甚至燃烧。泥炭地燃烧将消耗土壤有机质,同时严重火灾抵制植物的生长,导致土壤表面下沉以及不同植物群落结构发生改变等。

2.2.3 功能法 由上述可知,湖泊水量与水资源功能有着千丝万缕的联系,基于生态水文学原理,提出了计算湖泊最小生态需水量的另一种方法,即功能法。计算公式为:

$$V_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i V_i}{n} \quad (3)$$

式中, $V_{\min}$ 为湖泊最小生态需水量; β_i 为第 i 个湖泊水资源功能系数(且 $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \dots + \beta_n = 1.0$); V_i 为第 i 个湖泊水资源功能最小生态需水量; n 为湖泊水资源功能数。

计算步骤如下:

- (1)研究分析得出湖泊的水资源功能;
- (2)建立湖泊水资源功能指标体系;
- (3)分析计算湖泊的每个水资源功能所需要的最小生态需水量;
- (4)综合考虑最大值原则和湖泊的具体情况及管理目标,来确定 β_i 。

2.3 最低生态水位法

所谓最低生态水位法是指通过湖泊最低生态水位(为保证特定发展阶段的湖泊生态系统结构的稳定与功能的正常发挥并保护生物多样性所需要的最低水位)及其面积来确定湖泊最小生态需水量的一种方法。不同流域水位和水深与湖泊生态系统的面积与容积具有明显的相关性,湖泊生态系统各组成部分生长繁殖所必需的水位和水深不同,为实现不同的湖泊系统的生态环境功能所必需的水位和水深也不同^[12]。从湖泊的基本特征即水文特征、理化特征、沉积特征以及生物特征等出发,最低生态水位法计算公式为:

$$V_{\min} = kS(H_{\min} - H) \quad (4)$$

式中, $V_{\min}$ 为湖泊最小生态需水量; $H_{\min}$ 为湖泊最低生态水位; H 为湖底高程; S 为湖泊水面面积; k 为湖岸系数。

由公式(4)计算湖泊最小生态需水量,关键是确定湖岸系数 K 和湖泊最低生态水位 $H_{\min}$ 。湖岸系数是表明湖泊形状规则以及反映湖岸植被种类及其生长情况的系数,它的确定可有两种方法:①专家判断法;②湖底平均坡度法,即以湖底平均坡度来近似地作为湖岸系数。计算公式如下^[31]:

$$K = \operatorname{tg} \alpha = \frac{(0.5l + l_1 + l_2 + \dots + l_{n-1} + 0.5l_n)h}{A} \quad (5)$$

式中, K 为湖岸系数; l 为岸线的长度; $l_1, l_2, \dots, l_n$ 为各等深线长; h 为等深线高差; A 为湖泊表面积; α 为湖底平均倾斜角。

如果湖泊的形状近于圆形,根据施成熙教授所建议的近似地计算湖底平均坡度的公式用来计算湖岸系数。计算公式如下^[31]:

$$K = \frac{Z_{\max}}{\sqrt{\frac{A}{\pi}}} = 1.77 \frac{Z_{\max}}{\sqrt{A}} \quad (6)$$

式中, $Z_{\max}$ 为湖泊最大深度; A 为相应于 $Z_{\max}$ 的湖水面积。

关于确定湖泊最低生态水位,国外主要依据所要保护的敏感指示物种对水环境指标的需求,但在计算时,更加注意水位的涨落限制^[32]。在我国,对湖泊最低生态水位已有一定的研究,其中公开发表的有徐志侠等人^[17]提出 3 种确定湖泊最低生态水位

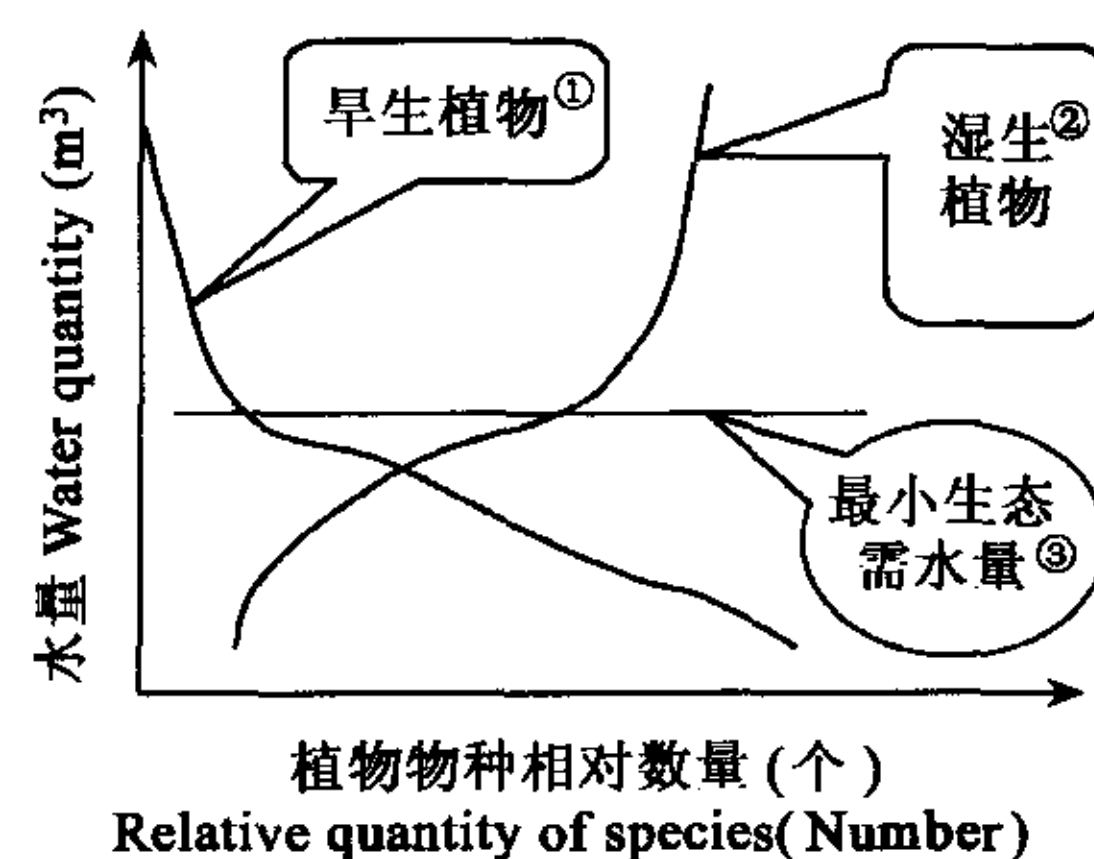


图3 湖泊水量与植物物种相对数量关系示意

Fig. 3 Relationship between water quantity and relative quantity of species for lakes

① Xerophyte; ② Hygrophyte; ③ The minimum ecological water requirement

的方法。本文从生态水文学角度,提出两种计算湖泊最低生态水位方法。

2.3.1 最低年平均水位法 参照河流最枯月平均流量法及水文学中 Taxas 法,结合我国的实际情况,提出了最低年平均水位法来计算湖泊最低生态水位。计算公式为:

$$H_{\min} = \lambda \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n}$$

(7)

式中, $H_{\min}$ 为最低生态水位; H_i 为年最低水位; λ 为权重; n 为统计年数。

利用最低年平均水位法计算湖泊最低生态水位,关键是权重 λ 的确定。权重 λ 实际上是反映湖泊历年年最低水位的平均值与最低生态水位的接近程度。可采用水文统计方法、反馈法(即通过计算历年年最低水位的平均值来对照历史生态状况而确定权重 λ 的一种方法)和专家判断法来确定,其值一般在 0.650~1.550 之间。最低年平均水位法主要考虑将未来湖泊最低生态水位保持在历史平均最低水位百分比的水平上,其有利方面是计算简单,不需要考虑生物的细节信息,不利方面是缺乏对目前生态价值的直接关注。

2.3.2 年保证率设定法 基于杨志峰等^[14]提出的用来计算河道基本环境需水量的月(年)保证率设定法的基本原理及水文学中 Q95th法来计算湖泊最低生态水位。计算公式如下:

$$H_{\min} = \mu \bar{H}$$

(8)

式中, $H_{\min}$ 为最低生态水位; $\bar{H}$ 为某保证率下所对应的水文年年平均水位; μ 为权重。

计算步骤如下:

- (1)根据系列水文资料,对历年最低水位按照从小到大的顺序进行排列;
- (2)根据湖泊自然地理、结构和功能选择适宜的保证率(50%、75%、95%),然后计算该保证率下所对应的水文年;
- (3)计算水文年年平均水位;
- (4)确定权重 μ 。

以水文年年平均水位作为湖泊最低生态水位,因没有考虑生物的细节而计算的结果可能与客观情况有一定差别。为了使得成果更加符合实际情况,故用权重 μ 来进行调整。它反应的是水文年年平均水位与最低生态水位的接近程度。计算有两种方法:①专家判断法;②根据水文年湖泊生态系统健康等级来估算。对于湖泊生态系统健康等级的研究,目前已有不少研究,本文根据文献[14],将湖泊生态系统健康等级分为优、较好、中等、差和极差等 5 个级别。当水文年湖泊生态系统健康等级为较好以上时,说明该年的水位为湖泊的正常水位,这时,计算结果应适当下调;湖泊生态系统健康等级为中等时,说明该年的水位能维持湖泊生态系统的动态平衡;湖泊生态系统健康等级为差或者极差时,说明该年的水位不能满足湖泊生态系统的需水要求,此时,计算结果应适当上调。再由生态水文学原理,可确定权重 μ 与湖泊生态系统健康等级的对应关系(表 2)。

3 不同计算方法优缺点分析

(1)曲线相关法的原理是基于生态水文学中湖泊水量与生态功能的相关性、水资源危机标准的确定及其湖泊生态管理目标等。它是统计历史并结合现状的有关生态水文信息来预测湖泊未来的生态发展情势。其优点在于全面考虑了湖泊的生态环境功能,直接针对目前系统的生态价值和现存问题,并充分反映了湖泊生态系统健康状况与水量之间的相关关系。缺点在于需要大量的连续生态功能指标系列数据和相应的水文数据,对于我国目前来说,既具有生态数据又具有天然水文数据的湖泊数量相当之少。因而该方法对于许多湖泊在实际操作上将有很大的难度,故应用的范围也就较小。不过,随着我国对湖泊生态环境的日益重视,有理由相信,在未来,该方法将是研究湖泊生态环境需水的重要途径之一。

(2)功能法是从生态水文学中水资源功能与水量关系角度出发,针对具体的湖泊,为维持其水资源功能而不至于造成显著危机时必须满足的水量。在理论方面,功能法的优点是全面考虑了湖泊的水资源功能,目标是能够确保湖泊所有功能的正常发挥。缺点是没有考虑水文条件对湖泊的影响。在具体应用方面,曲线相关法必须具有生态资料和水文资料的条件下才能应用,目前,我国大多数湖泊往往存在天然水文资料缺乏的问题。而功能法只需要一定的生态资料即可,故应用范围相对较广。

(3)水位是湖泊生态系统的重要特征,水位的调整能控制植被、改变植被多样性以及恢复退化的湖泊,以此控制野生动物的种类。因而,在供水管理中最重要内容就是确定湖泊的最低生态水位,最低生态水位确定之后,才能对湖泊的可利用水量进行合理分配,如灌溉、城市用水、发电用水等。本文提出的最低生态水位法是基于生态水文学中的动植物对水因子的适应原理来进行研究的,即湖泊生态系统已经适应了天然多年最低水位,湖泊水位低于最低生态水位,将会破坏湖泊生态系统的动态平衡。其

表 2 湖泊生态系统健康等级与权重 μ 的对应关系

Table 2 Corresponding relationship between ecosystem health grade of lakes and parameter μ

湖泊生态系统健康等级	优	较好	中等	差	极差
Ecosystem health grade of lakes	Best	Better	Well	Worse	Worst
权重 Parameter μ	0.945	0.975	1.000	1.005	1.013

优点是考虑了水文条件对湖泊系统的动态影响。但在具体应用时,建立动态模型需要有大量的天然水位资料。

4 结论

(1)本文从生态水文学理论出发,讨论了湖泊最小生态需水量的概念,提出了计算湖泊最小生态需水量的3种方法:曲线相关法、功能法和最低生态水位法。曲线相关法是利用水量与生态功能的关系来确定湖泊最小生态需水量,其假设当湖泊生态功能发生不利突变时所对应的湖泊水量是湖泊生态需水量的临界值。功能法是利用水资源功能与水量来确定湖泊最小生态需水量,分析时需要生态学、动植物学和水文学理论的技术支持。最低生态水位法是利用湖泊面积与水位的关系来计算最小生态需水量,该方法关键是确定湖泊最低生态水位,本文从生态水文学角度提出了2种方法:最低年平均水位法和年保证率设定法。

(2)对于不同研究区域和对象,要在对其生态环境特点、水资源时空分布和区域社会发展水平进行分析之后,确定计算方法。对于具有生态和天然水文资料的湖泊,选择曲线相关法比较合适;对于只有生态资料的湖泊,可选择功能法;最低生态水位法比较适用只有天然水文资料的湖泊。另外,不同计算方法的实用性和预测的准确性还需要通过实例研究进行验证。

(3)湖泊最小生态需水是生态学、水文学研究的一个新领域,包括基本概念在内的许多方面尚不成熟。本文只是从生态水文学角度进行了探索,在具体研究方法也存在着需要改进的地方,如一些模型权重的确定还没有摆脱人为的主观因素。

References:

- [1] Wang S M. *Lakes of China*. Beijing: Science Press, 1998.
- [2] Jing X C, Liu S K, Tu Q Y, et al. *Lake environment of China*. Beijing: China Ocean Press, 1995.
- [3] Raskin P D, Hansen E, Margolis R M. Water and Sustainability: Global Patterns and Long-range Problems. *Natural Researchs Forum*, 1996, 20(1):1~15.
- [4] Baird A J, Wilby R L. *Eco-hydrology: Plant and water in terrestrial and aquatic environments*. London and New York: Routledge Press, 1999. 78~7156.
- [5] David R T, Harish B, Ronald R. Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 2002, (26):81~109.
- [6] Ngana J O, Mwalyosi R B, Madulu N F. Development of an integrated water resources management plan for the Lake Manyara sub-basin, Northern Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 1033~1038.
- [7] Tang Q C. The Development in Oases and Rational Use of Water resource. *Journal of Land Resource and Environment*, 1995, 9(3):107~112.
- [8] Jia B Q, Ci L J. The primary estimation of water demand for the eco-environment in Xinjing. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3):243~250.
- [9] Li L J, Zheng H X. Study on the eco-environmental water demand of river system in Hai-Luanhe basin. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(4):495~500.
- [10] Lu Y H. *Study on Water Resources Rational Utilization and Eco-environmental Protection of Qaidam Basin*. Beijing: Science Press, 2000.
- [11] Cui B S, Yang Z F. Water consumption for eco-environmental aspect on wetlands. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(2):219~224.
- [12] Liu J L, Yang Z F. A study on the calculation methods of the minimum eco-environmental water demand for lakes. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(5):604~609.
- [13] Tang K W, Wang H, Wang Y. Preliminary study of Hongjiannao Lake's variation and ecological water demand, *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(3):304~309.
- [14] Yang Z F, Cui B S, Liu J L, et al. *The theory, method and practice of ecological environment water demand*. Beijing: Science Press, 2003.
- [15] Wei Y C, Miao H, Ou Y Z Y, et al. Primary estimate of ecological water requirement in Haihe Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10):2100~2107.
- [16] Wang X K, Zhao T Q, Ou Y Z Y, et al. Researches on ecological water demand of Wulianghai Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10):2124~2129.
- [17] Xu Z X, Chen M J, Dong Z C. Researches on the calculation methods of the lowest ecological water level of lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10):2324~2328.
- [18] Hu F R. *Hydrology Theory*. Beijing: Water Power and Water Electric Press, 1985.
- [19] Chen Y X. *Environmentology*. Beijing: China Environmental Science Press, 2001.
- [20] Zhao W Z, Wang G X. *Eco-hydrology—Plants and water in terrestrial and aquatic environments*. Beijing: China Ocean Press, 2002.
- [21] Baird A J, Wilby R L. *Eco-hydrology: Plant and water in terrestrial and aquatic environments*. London and New York: Routledge Press,

1999. 78~156.

- [22] Geng H J. *Project Hydrology Basic*. Beijing: China Water Power and Water Electric Press, 2003.
- [23] Davis S M, Ogden J C. *Everglades: The Ecosystem and Its Restoration*. ST. Lucie Press, Delray Beach, 1994. 307~322.
- [24] Loveless C M. A study of the vegetation of the Florida Everglades. *Ecology*, 1959, **40**(1): 1~9.
- [25] Schortemeyer J L. *An evaluation of water management practices for optimum wildlife benefits in Conservation Area 3A*. Florida Game and Freshwater Fish Commission, 1980. 66~78.
- [26] Wade D, Ewel J, Hofstetter R. Fire in south Florida ecosystems. General Tech. *Agriculture Forest service Asheville*, 1980, 23~35.
- [27] Zaffke M. Plant communities of Water Conservation Area 3A; Baseline documentation prior to the operation of S-339 and S-340. Tech. Memo. South Florida Water Management District, West Palm Beach, FL, 1983.
- [28] Gunder L H, Snyder J R. Fire patterns in the southern Everglades. Delray Beach, 1994, 291~306.
- [29] Alexander T R, Crook A G. *Recent vegetation changes in South Florida*. Miami Geological Society, Miami, 1984.
- [30] Cornwell G, Hutchinson E C. *An Ecological Analysis of an Everglades Township in Southwest Palm Beach County*, Florida. Ecoimpact Inc, Gainesville, 1974.
- [31] Cui G B. *Lakes & Reservoir Hydrology*. Nanjing: He Hai University Press, 1990.
- [32] Ripl W, Pokorny J, Eiseltova M, et al. *A holistic approach to the structure and function of wetlands, and their degradation*. IWRB Public, 1994, **32**: 16~35.

参考文献:

- [1] 王苏民. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 金相灿, 刘树坤, 屠清瑛, 等. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [7] 汤奇成. 绿洲的发展与水资源的合理利用. 干旱区资源和环境, 1995, **9**(3): 107~112.
- [8] 贾保全, 慈龙骏. 新疆生态用水的初步估算. 生态学报, 2000, **20**(3): 243~250.
- [9] 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态需水量计算. 地理学报, 2000, **55**(4): 495~500.
- [10] 刘燕华. 柴达木盆地水资源合理利用与生态环境保护研究. 北京: 科学出版社, 2000.
- [11] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态环境需水量研究. 环境科学学报, 2002, **22**(2): 219~224.
- [12] 刘静玲, 杨志峰. 湖泊生态环境需水量计算方法研究. 自然资源学报, 2002, **17**(5): 604~609.
- [13] 唐克旺, 王浩, 王研. 陕北红碱淖湖泊变化和生态需水初步研究. 自然资源学报, 2003, **18**(3): 304~7309.
- [14] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲, 等. 生态环境需水量理论、方法与实践. 北京: 科学出版社, 2003.
- [15] 魏彦昌, 苗鸿, 欧阳志云, 等. 海河流域生态需水核算. 生态学报, 2004, **24**(10): 2100~2107.
- [16] 王效科, 赵同谦, 欧阳志云, 等. 乌梁素海保护的生态需水量评估. 生态学报, 2004, **24**(10): 2124~2129.
- [17] 徐志侠, 陈敏建, 董增川. 湖泊最低生态水位计算方法. 生态学报, 2004, **24**(10): 2324~2328.
- [18] 胡芳荣. 水文学原理. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [19] 陈英旭. 环境学. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [20] 赵文智, 王根绪译. 生态水文学-陆生环境和水生环境植物与水分关系. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [22] 耿鸿江. 工程水文基础. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [31] 崔广柏. 湖泊水库水文学. 南京: 河海大学出版社, 1990.