

# 乌梁素海保护的生态需水量评估

王效科, 赵同谦, 欧阳志云, 范秀英

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:**结合乌梁素海湿地生态系统特征, 基于保证水量、保证水质和改善水质(对于污染湖泊)3个层次的湖泊湿地保护目标, 给出了不同环境保护目标下湖泊湿地的生态需水量估算方法, 并在系统分析乌梁素海水文水循环特征的基础上, 选择适合的计算方法, 对乌梁素海不同保护目标下的生态需水量进行了估算。结果表明, 从保证水量平衡角度看, 乌梁素海排干系统排入湖泊水量为  $6.18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 可以保证乌梁素海的水量平衡; 从保证水质角度看, 由于作为生态用水的黄河水总 N 浓度超过国家地表水水质标准中湖泊水质 V 类水标准限值的 1.6 倍, 比乌梁素海湖水总 N 含量还要高, 因此, 完全达标的生态需水量是不存在的, 但如果只考虑盐分和总 P, 在现有排干水量为  $6.18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  条件下, 则维持乌梁素海的盐分和 P 浓度不变的生态需水量分别为  $1.82 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  和  $12.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ; 从保证湖水水质达标角度看, 现有污染物排放情况下, 1a 盐分和总 P 达标的生态需水量分别为  $4.91 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  和  $16.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 10a 盐分和总 P 达标的生态需水量应分别为  $4.28 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  和  $14.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。  
**关键词:**生态需水量; 乌梁素海; 水资源; 评估

## Researches on ecological water demand of Wuliangshuai Lake

WANG Xiao-Ke, ZHAO Tong-Qian, OUYANG Zhi-Yun, FAN Xiu-Ying (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2124~2129.

**Abstract:** Ecological water demand for wetland is a newly integrated concept, which are required for maintaining ecosystem structure and function, protecting biodiversity, sustaining human life and activities, and improving environment quality. In arid and semi-arid areas of northern China, lakes have been facing a number of problems such as dried-up, shrinkage and serious water pollution. The estimation of ecological water demand for lake is the basic precondition to keep rational utilization or restoration of lake ecosystem. In this paper, the characteristics of Wuliangshuai Lake ecosystem were studied at first, and different calculating methods were deduced under different protected targets such as water amount balance, water quality maintenance and its improvement. Based on the investigated data about hydrological and water cycling features, ecological water demand of Wuliangshuai Lake were calculated under different targets by selecting suitable methods.

The results of this study consisted of three aspects. Firstly, when drainage amount from adjacent farmland to the lake reach  $6.18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , the water balance of Wuliangshuai Lake in amount could be kept. Secondly, the total nitrogen concentration in Huanghe River, which is the source of ecological water, is higher than that in Wuliangshuai Lake. Under this condition, from the viewpoint of water quality maintenance, it is impossible for the lake to meet the relative national standard. But only if the salts and total Phosphorus be considered, under the present drainage amount from farmland of  $6.18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , the ecological water demand amount to maintain the salts and P concentration constant should be  $1.82 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  and  $12.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  respectively. Finally, from the point of view of water quality improvement, the ecological water demand amount that can improve the salts and P to meet the national standard in one year should be  $4.91 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  and  $16.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  respectively, and in ten years, it should be  $4.28 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  and  $14.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  respectively.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(30070149, 30230690)

**收稿日期:**2004-05-11; **修订日期:**2004-06-20

**作者简介:**王效科(1964~), 男, 陕西岐山人, 博士, 研究员, 主要从事生态系统评价与规划, 全球气候变化研究。E-mail: wangxk@mial.rcees.ac.cn

**Foundation item:** the National Natural Science Foundation of China (No. 30070149, 30230690)

**Received date:** 2004-05-11; **Accepted date:** 2004-06-20

**Biography:** WANG Xiao-Ke, Ph. D., Professor, mainly engaged in ecosystem assessment and planning, global climate change. E-mail: wangxk@mial.rcees.ac.cn

**Key words:** ecological water demand; the Wuliangshuai Lake; water resources

文章编号:1000-0933(2004)10-2124-06 中图分类号:TV213.4,X143,X171 文献标识码:A

随着社会经济的发展,生态环境问题日益严重,保护和恢复受损生态系统已经成为实现可持续发展的重要战略措施之一。在我国,生态环境脆弱的西北干旱地区的生态系统严重退化问题已经得到广泛的关注<sup>[1]</sup>。干旱地区的大部分生态环境退化都与水密切相关,水资源的短缺和不合理利用是许多生态问题的起因。因此,近些年来,有关生态用水估算分析的文献大量出现在各类科技杂志中<sup>[2~6]</sup>,并普遍认识到,生态环境的建设和保护必须有一定的生态用水来维持生态系统的功能<sup>[7~9]</sup>。

乌梁素海位于内蒙古西部干旱荒漠地区,是内蒙古第二大内陆淡水湖。湖区南北长 35~40 km,东西宽 5~10 km,总面积 296 km<sup>2</sup>,湖泊水位海拔 1018.5 m 时,平均水深 1.09 m,库容 3.3 亿 m<sup>3</sup>,地势低洼,是河套灌区地表径流和地下水的排泄区,也是灌区退水和北部狼山部分山洪进入黄河的通道。在附近较大范围内,湖泊湿地很少,并且多为盐湖。乌梁素海湿地是野生候鸟的重要栖息地,其中有国家一级保护鸟类 5 种,二级保护鸟类 25 种,总鸟类品种有 195 种。另外,渔业的年产量为 200 t 左右,芦苇的年产量为  $11 \times 10^4$  t<sup>[10]</sup>。目前乌梁素海湿地面临的生态环境问题非常严重,由于河套灌区内的工业和生活污染物的排放和农业面源污染,乌梁素海的水质正在不断严重恶化。有 7 项水质指标超过国家 II 类水质标准,湖内藻类大量繁殖,湖泊富营养化严重,再加上今年来,湖内大量种植芦苇,使得湖泊淤积日趋严重。据估计,乌梁素海目前正在以 0.09 m/a 的速度淤积,湖泊的消亡正在加快。如何有效的保护乌梁素海,已经成为我国生物多样性保护和当地社会经济可持续发展的重要任务。毫无疑问,提供一定的补充水源是保护乌梁素海正常功能的前提条件,因此,应该提供多少水量才能达到保护乌梁素海的目的,即乌梁素海的生态需水量是多少,是开展乌梁素海湿地生态系统保护和恢复的关键。

本文在简要论述生态需水的定义和评价方法基础上,以我国西北干旱地区的乌梁素海为例,从水量平衡、保护水质和改良水质等多种环境保护目标出发,分别估算了乌梁素海的生态需水量,目的在于黄河流域的水资源管理和乌梁素海的保护和恢复提供科学依据。

## 1 研究方法

水是湿地生态系统存在的前提条件。湿地生态系统的服务功能取决于水量和水质,一定的水量提供了生物生存的栖息条件,而且可以通过改变水量来改善水质。一方面,大量水可以稀释污染湖泊湿地中的水体,使水体污染物的浓度降低到对生物不产生严重危害;另一方面,可以用清洁水体置换湖泊湿地中的污染水体,达到降低污染程度。因此,通过引入一定量的外来水可以达到保护湿地生态系统的服务功能,这就是人们所说的生态需水。

生态需水的数量与人们期望的湿地生态系统所能达到的服务功能质量和数量密切相关。一方面,由于湿地生态系统服务功能评价是一件比较复杂的工作,需要大量的基础调查观测研究,对于大部分湖泊湿地生态系统是不具备的;另一方面,有关湿地生态系统服务功能与水量和水质的数量关系方面的基础研究成果还比较缺乏。因此,本研究中借助现有的有关生态环境保护方面的标准来代替湿地生态系统服务功能期望值,根据生态环境保护目标估算其生态需水量。

### 1.1 乌梁素海的水循环特点

河套灌区地势西南高东北低,乌梁素正好位于河套灌区东北部的黄河古河道,地势低洼。因此,河套灌区的灌溉弃水、生产生活废水和地下水及降水洪水是乌梁素海的主要水源。乌梁素海水体的减少主要是流入黄河及渗漏和蒸发蒸腾。在乌梁素海流入黄河的出水口,由于有乌毛计闸控制出水量,可以通过减少乌梁素海排水量来保证水面海拔高度稳定在 1018.5 m,来维持乌梁素海的总水量。来自灌区的水体不但是维持乌梁素海存在的前提,而且也将污染物带入乌梁素海,成为乌梁素海水质恶化的主要原因。目前乌梁素海的污染已经非常严重,逐步改善乌梁素海的水质,应该是保持其湿地生态系统服务功能的主要任务。

### 1.2 生态环境保护目标

湖泊的保护,可以是为了不同的目标。对于乌梁素海的保护,应该从保证水量、保证水质和改变水质(对于污染湖泊)3 个层次来制定目标,具体如下:

(1) 维持水量 为了保持水位不降低和湖泊面积不缩小,要求有一定的输入水量,这种输入水量可以成为水量平衡时的生态需水。

(2) 维持盐分和污染物浓度不增加 由于输入水会带入污染物,而湖泊湿地的水分蒸发会造成污染物在水体中的富集,因此要保持湖泊湿地的水质不发生恶化,就需要输入一定量的无污染或低污染水体,这种输入的水量可称为物质平衡的生态需水。对乌梁素海来说,主要是要防止水体中盐分和 N、P 等污染物的积累,即水体中过多的盐分和 N、P 能够被输出的水体带走。

(3) 逐渐改善已经污染的生态环境 对于类似于乌梁素海的湖泊湿地,要保证具有较高的生态系统服务功能,就必须使得已经受到污染的水体水质能够逐渐改善,达到一定的水质标准。其中,一种方法就是通过输入一定量的干净水体,使污染水体不断得到置换,一定时间后达到水质标准。这样输入水量就成为环境改良的生态需水。

### 1.3 生态需水量估算方法

不同的生态环境保护目标,生态需水的估算方法是不同的。

#### 1.3.1 水量平衡时的生态需水量( $Q_{eco1}$ ) 应等于水量平衡值,即湖泊水体的损失,为湖泊流出水量总和减去进入湖泊水量:

$$Q_{eco1} = Q_{out} - Q_{in} \quad (1)$$

$$Q_{out} = O + D + E \quad (2)$$

$$Q_{in} = R + F + A + G \quad (3)$$

式中,湖泊损失和流出水量  $Q_{out}$  包括 4 部分, $O$  为从湖泊排入黄河的水量, $D$  为湖泊渗漏量, $E$  为湖泊蒸发蒸腾量。

入湖水量  $Q_{in}$  包括 5 部分, $R$  为湖面降水量, $F$  为降水引起的洪水入湖水量, $A$  为来自排干系统的农田退水和生产生活废水量, $G$  为地下水补给。

在估算时,有些分量可以假设是不变的,并用  $Q_k$  表示,即:

$$Q_k = (D + E) - (R + F + G) \quad (4)$$

则生态需水方程可以写为:

$$Q_{eco1} = Q_k + O - A \quad (5)$$

#### 1.3.2 物质平衡时的生态需水量( $Q_{eco2}$ ) 应该服从湖泊湿地的水质平衡。假定湖泊湿地的物质贮存量是稳定的,则对每一污染元素,输入的物质总量应该等于排出的元素物质总量。这里,主要是考虑水体中的盐分、 $N$ 和 $P$ 。假设生态用水将全部经湖泊混合后完全排出,则有:

$$Q_{eco2} \cdot C_{eco} = (Q_{out} + Q_{eco2}) \cdot C_{out} - Q_{out} \cdot C_{in} \quad (6)$$

$$Q_{out} \cdot C_{out} = O \cdot C_o + D \cdot C_d + H \cdot C_h \quad (7)$$

$$Q_{in} \cdot C_{in} = R \cdot C_r + F \cdot C_f + A \cdot C_a + G \cdot C_g \quad (8)$$

式中, $C_{out}$ 、 $C_{in}$  和  $C_{eco}$  分别为湖泊湿地的输出、输入和生态用水的浓度; $C_r$ 、 $C_f$ 、 $C_a$  和  $C_g$  分别为湖面降水、入湖洪水、来自排干系统的农田退水和生产生活废水和地下水补给水体的盐分或  $N$ 、 $P$  的浓度; $H$  为每年的芦苇收获量; $C_o$ 、 $C_d$  和  $C_h$  分别为从湖泊排入黄河的水体、湖泊渗漏水体和收获物的盐分或  $N$ 、 $P$  的浓度。事实上,湖泊湿地的各输出分量水体的浓度应该等于湖泊水体浓度( $C$ ),式(7)就可以简化为:

$$Q_{out} \cdot C_{out} = (O + D) \cdot C + H \cdot C_h \quad (9)$$

同样,物质平衡时的生态需水量估算时,设定有些分量是稳定的,为  $Q_{Ck}$ ,即:

$$Q_{Ck} = (D \cdot C + H \cdot C_h) - (R \cdot C_r + F \cdot C_f + G \cdot C_g) \quad (10)$$

$$Q_{eco2} = (A \cdot C_a - O \cdot C - Q_{Ck}) / (C - C_{eco}) \quad (11)$$

#### 1.3.3 环境改良的生态需水( $Q_{eco3}$ ) 的估算应该采用动态的观点,考虑水质达标( $C_{std}$ )所需要的时间( $r(a)$ )、湖泊湿地的水体总量 $Q$ 和污染物浓度 $C_q$ 。此时湖泊湿地水体浓度在 $r$ 年后应该达到 $C_{std}$ ,并且可以假设每年能够提供的生态需水数量是一样的,为 $Q_{eco3}$ ,并且提供的生态用水全部排出。

假设第 1 年提供生态用水( $W_{eco3}$ ),年初和年末湖泊湿地水体的污染物浓度分别为  $C_0$  和  $C_{01}$ ,根据物质平衡原理,湖泊湿地的污染物减少量为输出量减去输入量:

$$Q(C_0 - C_{01}) = (Q_{out} + Q_{eco3}) \cdot C_{out} - (Q_{eco3} \cdot C_{eco} + Q_{in} \cdot C_{in})$$

将(7)和(8)式代入得:

$$Q(C_0 - C_{01}) = O \cdot C_{01} + D \cdot C_{01} + H \cdot C_h + Q_{eco3} \cdot C_{out} - (Q_{eco3} \cdot C_{eco} + R \cdot C_r + F \cdot C_f + A \cdot C_a + G \cdot C_g) \quad (13)$$

从上式可以得出:

$$C_{01} = (Q_{eco3} \cdot C_{eco} + R \cdot C_r + F \cdot C_f + A \cdot C_a + G \cdot C_g - H \cdot C_h - Q_{eco3} \cdot C_{out} + Q \cdot C_0) / (Q + O + D) \quad (14)$$

此式可以简化为:

$$C_{01} = K_1 + K_2 \cdot C_0 \quad (15)$$

其中:

$$K_1 = (Q_{eco3} \cdot C_{eco} + R \cdot C_r + F \cdot C_f + A \cdot C_a + G \cdot C_g - H \cdot C_h - Q_{eco3} \cdot C_{out}) / (Q + O + D) \quad (16)$$

$$K_2 = Q / (Q + O + D) \quad (17)$$

同样道理,第 2 年末湖泊湿地水体的污染物浓度( $C_{02}$ )为:

$$\text{万方数据 } C_{02} = K_1 + K_2 \cdot C_{01} = K_1 + K_1 \cdot K_2 + K_2^2 \cdot C_0 = K_1(1 + K_2) + K_2^2 \cdot C_0$$

因此,得到第  $r$  年末湖泊湿地水体的污染物浓度( $C_{0r}$ )为:

$$C_{or} = K_1(1 + K_2 + \dots + K_2^{(r-1)}) + K_2^r \cdot C_0 \tag{18}$$

如果在  $r$  年要使水质达标, 则有:

$$C_{or} = C_{std} \tag{19}$$

这样, 如果能够求解以下方程, 就可以得到每年需要提供的生态需水( $Q_{ec03}$ ):

$$C_{std} = K_1(1 + K_2 + \dots + K_2^{(r-1)}) + K_2^r \cdot C \tag{20}$$

1.4 乌梁素海的生态需水量估算

用以上方法估算乌梁素海生态需水量时, 应充分考虑乌梁素海的实际情况, 不但要考虑乌梁素海的来水和排水系统及其水量和水质, 而且要结合乌梁素海现有的水质监测资料。水量和水质资料主要来自《内蒙古河套灌区续建配套和节水改造工程环境影响报告书》。

1.4.1 水量资料 灌区排干系统输入水量来源于河套灌区的多年统计资料(1987~1997年), 取  $6.18 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 山洪的补给来自北、东两岸的山谷洪水, 主要有余太河、哈拉乌苏等 8 条干谷。洪水流入量约为  $0.52 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。降水量采用西山咀气象站 1968~1997 年多年平均值, 即  $0.657 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。地下水的补给量主要来源于乌梁素海东岸的泉水补给, 20 世纪 80 年代时测量为 0.175 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ 。

目前向黄河的泄水量, 1987~1997 年乌梁素海从西山咀泄入黄河的水量平均为  $2.42 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ; 对乌梁素海明水区、芦苇和沼泽区的蒸发量分别计算得出, 1970~1997 年多年平均全湖的蒸发量为  $3.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; 西山咀气象站提供全湖渗漏量为  $0.58 \times 10^8 \sim 0.75 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 这里取平均值  $0.66 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

从现有的水量资料(表 1)来看, 进入乌梁素海的总水量为  $7.532 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 从乌梁素海排出的总水量为  $6.19 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 进入量比排出量多  $1.413 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 这可能是由于对于芦苇蒸腾量和渗漏量估计不够精确。为了达到水量平衡, 假设存在一个未知的排水量为  $Q_0$ , 其值为  $1.413 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 并将  $Q_0$  加入  $Q_k$ (式 4)的估算中, 则得到  $Q_k = 3.831$ 。

表 1 乌梁素海多年平均进排水量 ( $\times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ )

Table 1 The annual mean input and output of water in Wuliangsu Lake

项目 Item	来自排干 系统(A) Drainage from farmland	降水量(R) Precipitation	山洪(F) Flood	地下水补给(G) Ground water	进水量 合计 Total input	入黄水量(O) discharge to Huanghe river	渗漏量(D) Leakage	蒸发量(E) Evaporation	排水量 合计 Total output	进排水量 差 Balance between input and output
水量 Water amount	6.18	0.657	0.52	0.175	7.532	2.42	0.66	3.11	6.19	1.413

1.4.2 水质资料 入湖灌区排干系统的水质资料来源于对总排干口的多年监测值。盐分取 1995~1997 年的平均值  $2.09 \text{ g/L}$ , N 和 P 浓度分别取 1997~1999 年的平均值  $3.18 \text{ mg/L}$  和  $0.322 \text{ mg/L}$ 。

乌梁素海东岸的乌拉山地下水中矿化度为  $4.4 \text{ g/L}$ (全灌区平均值), 总氮含量为  $1.12 \text{ mg/L}$ , 总磷平均含量为  $0.097 \text{ mg/L}$ 。雨水和洪水水质资料缺乏, 采用文献中报道, 矿化度为  $0.07 \text{ g/L}$ <sup>[11]</sup>, 总氮平均含量为  $2.8 \text{ mg/L}$ , 总磷含量为  $0.18 \text{ mg/L}$ <sup>[12]</sup>。

湖泊水体总量约为  $3.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。湖泊目前的盐分、N 和 P 浓度分别取 1998~1999 年的平均值  $3.0 \text{ g/L}$ 、 $1.59 \text{ mg/L}$  和  $0.184 \text{ mg/L}$ 。这里, 没有考虑湖泊湿地水体的空间差异和时间变化, 即假定湖泊排出水和漏渗水污染物浓度与湖泊水体一致。

年芦苇的收获量 1999 年约为  $9 \times 10^4 \text{ t}$ , 湖内挺水和沉水植物平均含盐分  $0.5\%$ , 含氮量取  $3\%$ , 含磷为  $0.2\%$ <sup>[13]</sup>。

生态用水来自黄河。黄河在巴彦淖尔境内的水质矿化度多年平均在  $0.48 \sim 0.5 \text{ g/L}$ , 估算时取  $0.5 \text{ g/L}$ 。据测定, 黄河水 2003 年 6 月份的总 N 和 P 分别为  $3.3 \text{ mg/L}$  和  $0.05 \text{ mg/L}$ , 以此作为生态用水的水质参数。

1.4.3 估算方法 为了维持乌梁素海现有水面面积和芦苇正常生产, 可以通过控制出水量, 将乌梁素海水面的海拔高度稳定在  $1018.5 \text{ m}$ 。在这种情况下, 水量平衡中的一些分量可以认为是不变的, 如渗漏量、蒸发蒸腾量、湖面降水量、洪水入湖水量和地下水补给等。因此, 在计算生态用水时, 只需要考虑排入黄河的水量和来自排干系统的水量。通过对 1987~1997 年湖泊排入黄河水量和来自排干系统的水量进行分析, 发现两者有较好的相关关系(图 1):

$$O = 0.5863A - 1.2092 \tag{21}$$

可将该式分别代入(5)、(11)和(15)式, 计算不同生态环境保护目标下的生态需水量。

对于乌梁素海来说, 生态需水的提供主要有两种途径: 排干系统来水和从黄河引水。在水量平衡情况下, 可以利用排干系统来水作为生态用水。对于物质平衡时的生态需水量估算, 由于来自排干系统的水体的盐分、N 和 P 大于乌梁素海水体的相应污染物浓度, 如果直接引入灌区排干水, 势必造成乌梁素海水体质量的下降, 因此, 只能从直接从黄河引水作为生态用水, 并且须保证乌梁素海有劣于数据排出水, 即  $O > 0$ , 此时, 将(21)式代入(11)式, 就可以求出其生态需水量。同样, 环境改良的生态需水估算时, 乌梁素海水体要到达的标准, 矿化度应该小于  $1 \text{ g/L}$ , N 和 P 的水质目标参照《地表水环境质量标准》(GB3838~2002)中

的湖泊水库 V 类水标准,分别取 2.0 和 0.2 mg/L。环境改良的生态需水也只考虑直接从黄河引水,通过求解方程(20)式可以得出其生态需水量。

## 2 结果

### 2.1 水量平衡时的生态需水量

如果直接利用由排干系统进入乌梁素海的水体作为生态需水,则排干系统每年至少应该提供  $2.0624 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  的水量,才能维持乌梁素海的水量平衡。而目前排干系统提供的水量为  $6.18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,因此可以保证乌梁素海的水量平衡的。

如果排干系统能够长期提供  $6.18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  的水量,乌梁素海的生态需水将为 0,即不需要直接从黄河引水补给也能够维持乌梁素海的水量平衡。

### 2.2 物质平衡时的生态需水量

由于引自黄河的生态用水的总 N 浓度超过了乌梁素海的总 N 浓度,所以引入生态用水只能造成乌梁素海的进一步 N 污染。但从盐分和总 P 考虑,引入生态用水可以保证乌梁素海的盐分和 P 浓度保持不变。

需要引入的生态需水量与排干渠的入湖水量有关,随排干入湖水量的增加而增加。在现有排干水量为  $6.18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  时,维持乌梁素海的盐分和 P 浓度不变的生态需水量分别为  $1.82 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  和  $12.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (图 2)。

### 2.3 环境改良时的生态需水量

水体环境质量的达标需要满足多种指标,如盐分、总 N 和总 P。由于引自黄河的生态用水总 N 浓度已经超过相关的国家地表水质标准,因此将黄河水直接作为生态用水引入乌梁素海难以实现湖泊水质达标。这里,只考虑盐分和 P 含量的达标问题。

生态需水量还取决于要求乌梁素海水质达标所需要的时间长短。时间越短,生态需水量就越大。每年从排干渠进入乌梁素海的水量(事实上为污染物的量)也决定了生态需水量的大小。

计算得到,在现有的排干渠排水量和排放污染物的情况下, Fig. 2 Eco-water demand for sustaining nutrient balance in 1a 盐分和总 P 达标的生态需水量分别为  $4.91 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  和  $16.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,而 10a 盐分和总 P 达标的生态需水量则分别为  $4.28 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  和  $14.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (图 3)。

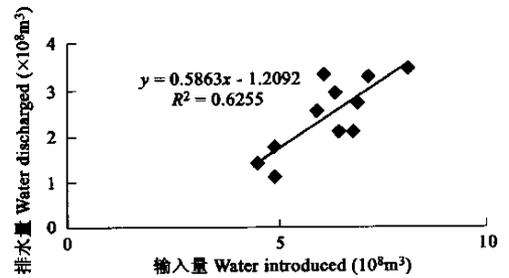


图 1 乌梁素海排出水量与排入水量的关系

Fig. 1 The relationship between Water discharged and introduced in Wuliangsu Lake

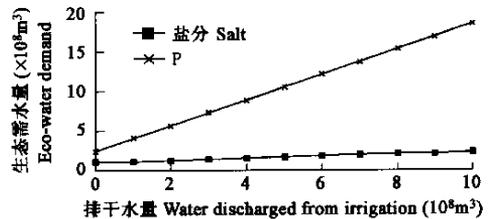


图 2 维持物质平衡时的生态需水量

Fig. 2 Eco-water demand for sustaining nutrient balance in Wuliangsu Lake

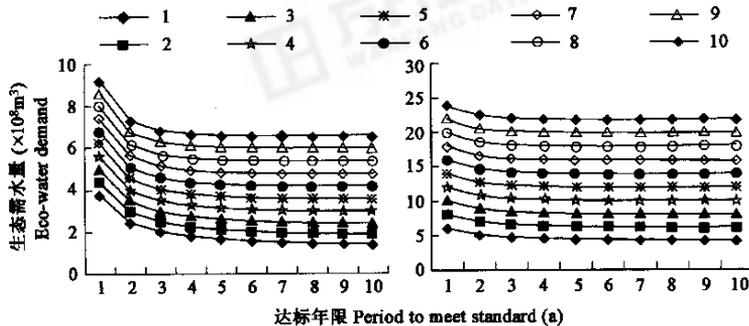


图 3 乌梁素海水质达标的生态需水量

Fig. 3 Eco-water demand to meet the standard of Wuliangsu Lake

## 3 问题与讨论

### 3.1 生态需水估算的前提和不确定性

不同方法估算的生态需水量往往不同,很大程度上取决于生态环境保护目标。从以上分析可以看出,满足水量、维持水质和改良水质的不同情况下,生态需水量的差别是比较大的。

从理论上讲,生态需水量应该是同时满足水量、水质多种元素要求的最小水量。对于目前的乌梁素海来说,可行的生态需水量是不存在的,因为作为生态用水的黄河水的总 N 不但超过国家地表水水质标准湖泊水质 V 类水(2.0 mg/L)的 1.6 倍,而

且比目前乌梁素海的总 N 还要高,因此在维持湖泊水质和改良水质的生态需水量研究中仅考虑了盐分和总 P。

值得注意的是,湖泊与底泥间的物质交换和大气物质的产生(如反硝化产生的含 N 气体)都会影响到湖泊中化学元素的平衡,这将影响到生态需水估算的结果,由于缺少有关的研究资料在本研究中未加考虑。

### 3.2 生态需水满足的可能性

从研究结果来看,要满足乌梁素海的水量平衡是可以的,但满足水质改善的要求则是比较困难的。由于从黄河引水的水体中总 N 浓度过高,除非能够在黄河水进入湖泊之前进行一些处理(如湿地系统等),否则,引入生态用水只会加剧水体的 N 污染。但是,考虑到湖泊富营养化过程中 N 和 P 需要一定的比例,在总 N 含量高的湖泊中,总 P 往往是决定湖泊水质总体质量的关键因子(或限制因子),如果能够有效地减少湖泊中总 P 的浓度,同样也可以达到防止湖泊富营养化的目标。因此,如果引入一定量的生态用水,使总 P 控制在较低水平,是可以达到改良湖泊水质的目标的。

为了维护生态环境质量,提供生态用水是一个重要的可选方案。本研究从理论上提供了一套生态需水量估算方法,并在乌梁素海得到初步应用。希望在国家的大型水利、农业和林业工程中,能够将生态用水真正落实到一定的水量指标和投资计划,从而有效地协调经济发展和生态环境保护之间的关系。

### References:

- [1] Wang F, Liang R J, Yang X L, *et al.* A study of ecological water requirements in northwest China theoretical analysis. *Journal of natural resources*, 2002, **17**(1):1~8.
- [2] Wang X Q, Liu C M, Yang Z F. Research advance in ecological water demand and environmental water demand. *Advances in Water Sciences*, 2002, **13**(4): 507~514.
- [3] Tang K W, Wang H, Liu C. Preliminary study of Hongjiaonao Lake's variation and ecological water demand, *Journal of natural resources*, 2003, **18**(3):304~309.
- [4] Song B Y, Yang J. Discussion on ecological use of water research. *Journal of natural resources*, 2003, **18**(5): 617~625.
- [5] Shi W, Wang G Q. Estimation of ecological water requirement for the lower Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2002, **57**(5): 595~602.
- [6] Cui B S, Yang Z F. Water consumption for eco-environmental aspect on wetlands. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, **22**:219~224.
- [7] Gleick P H. Water in Crisis: Paths to Sustainable Water Use. *Ecological Applications*, 1996, **8**(3): 571~579.
- [8] Hughes D A. Providing hydrological information and data analysis tools for the determination of ecological instream flow requirements for South African rivers. *Journal of Hydrology*, 2001, **241**: 140~151.
- [9] Rashin P D, Hansen E, Margolis R M. Water and Sustainability: Global Patterns and Long-range Problems. *Natural Resources Forum*, 1996, **20**(10):1~15.
- [10] Xing L L. *Avifauna of Wuliangsu Lake, Inner Mongolia, China*. Huhehaote: Inner Mongolia University Press, 1996.
- [11] Wang Z Q. *Chinese Salinized Soil*. Beijing: Science Press, 1993.
- [12] Liu S H, Yu X X, Yu Z M. Study on the precipitation chemical elements property of the water resources protection forest in the MiYun reservoir watershed. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(5):697~700.
- [13] Duan X N, Wang X K, Ouyang Z Y, *et al.* The biomass of *Phragmites australis* and its influencing factors in Wuliangsu Lake. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, **28**(2): 246~251.

### 参考文献:

- [1] 王芳,梁瑞驹,杨小柳,等.中国西北地区生态需水研究 (1)干旱半干旱地区生态需水理论分析.自然资源学报, 2002, **17**(1):1~8.
- [2] 王西琴,刘昌明,杨志峰.生态及环境需水量研究进展与前瞻.水科学进展, 2002, **13**(4): 507~514.
- [3] 唐克旺,王浩,刘畅.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): 304~309.
- [4] 宋炳煜,杨.关于生态用水研究的讨论.自然资源学报, 2003, **18**(5):617~625.
- [5] 石伟,王光谦.黄河下游生态需水量及其估算.地理学报, 2002, **57**(5):595~602.
- [6] 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.
- [10] 邢莲莲.内蒙古乌梁素海鸟类志.呼和浩特:内蒙古大学出版社, 1996.
- [11] 王遵亲.中国盐渍土.北京:科学出版社, 1993.
- [12] 刘世海,余新晓,于志民.密云水库集水区人工油松水源保护林降水化学性质研究.应用生态学报, 2001, **12**(5):697~700.
- [13] 段晓男,王效科,欧阳志云,等.乌梁素海野生芦苇群落生物量及影响因子分析.植物生态学报, 2004, **28**(2): 246~251.