

2005—2014年乌梁素海湖泊水质变化特征*

田伟东¹, 贾克力^{1**}, 史小红¹, 赵胜男¹, 吴用¹, 宋爽¹, 马军²

(1: 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

(2: 河套灌区排水事业管理局总排干沟红圪卜排水站, 巴彦淖尔 014400)

摘要: 为了确定乌梁素海湖泊水质变化特征, 选取乌梁素海 2005—2014 年 6—9 月长序列的水质实测数据, 分析溶解氧、化学需氧量、总氮、总磷及氟化物的年际变化特征。采用灰色模式识别模型对乌梁素海 2005—2014 年的水质进行评价, 并结合乌梁素海的实际状况, 从外源污染、入湖污染物负荷量及入湖水量 3 个方面对其水质变化的影响因素进行分析。结果表明: 2005—2014 年间, 水质状况转好; 除总磷外, 各污染指标浓度均有不同程度的下降; 灰色综合指数表明乌梁素海水质正向良性方向发展; 总磷治理应成为乌梁素海污染治理的主要方面; 外源污染的削减、入湖污染物负荷量的降低及入湖水量的增加是乌梁素海水质转好的主要影响因素。

关键词: 乌梁素海; 水质变化; 灰色模式识别模型; 影响因素

Water quality variation in Lake Wuliangshuai, 2005 – 2014

TIAN Weidong¹, JIA Keli^{1**}, SHI Xiaohong¹, ZHAO Shengnan¹, WU Yong¹, SONG Shuang¹ & MA Jun²

(1: *Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, P.R.China*)

(2: *Honggebo Drainage Station of Hetao Irrigation District Management Bureau of Inner Mongolia, Bayannur 014400, P.R. China*)

Abstract: To identify the water quality variation in the Lake Wuliangshuai, the observation data on the water quality during June and September from 2005 to 2014, is analyzed using a Grey Model, based on factors including dissolved oxygen, chemical oxygen demand, total nitrogen, total phosphorus, and fluoride. The driving force analysis on the water quality variation is carried out in terms of exogenous pollution, pollutant loading and the quantity of water input to the lake. The results show that during the period of 2005 to 2014, the water quality of the Lake Wuliangshuai was getting better. The concentration of each pollution index, except total phosphorus, was decreased with different degrees. The grey comprehensive index shows that the water quality of the Lake Wuliangshuai was improved and the governance of total phosphorus should be the main manner of pollution controls. The key driving factors of the water quality of the Lake Wuliangshuai getting better are due to the increasing the quantity of water input to the lake and the reduction quantity of input pollutant quantity as well as the reduction of exogenous pollution.

Keywords: Lake Wuliangshuai; water quality variation; Grey Model; influence factor

湖泊是重要的淡水资源, 具有调蓄洪水、供给水源、水产养殖、航运旅游及调节局部气候等多种生态功能, 对人类社会的健康可持续发展具有至关重要的作用^[1]。然而随着自然环境的变化以及人类活动干扰的不断加强, 湖泊水质环境受到严重威胁, 以水体富营养化^[2-4]、有机污染^[5-6]、沼泽化^[7-9]等为代表的问题严重制约着湖泊生态系统的健康发展。

乌梁素海位于内蒙古河套灌区灌排系统的末端, 是灌区生活污水、农田灌溉排水、退水及工业废水的承泄场所, 亦是污染物质的储存地, 属于典型的寒旱区人工控制型湖泊, 对于缓解黄河下游污染、水土保持、流

* 国家自然科学基金项目(51339002, 51269017, 51269016)、自治区级创新团队项目和内蒙古乌梁素海湿地生态站项目联合资助。2015-09-30 收稿; 2016-02-06 收修修改稿。田伟东(1990~), 男, 硕士研究生; E-mail: tianweidong1122@163.com.

** 通信作者; E-mail: kelijia58@126.com.

域环境改善都有极其重要的作用. 目前众多学者对乌梁素海水环境^[10-12]、沉积物^[13-15]、冰环境^[16-17]和大气沉降^[18]等方面的研究已取得很大进展,但都是基于短时间序列上的现状评价研究. 近年来,位于乌梁素海流域的河套灌区的种植结构已发生改变,各排干排水量也有较大变化. 因此,有必要进行乌梁素海长序列的水质变化研究,从而揭示其在长时间尺度上的水质变化规律,对乌梁素海环境污染控制与治理具有重要意义.

利用乌梁素海 2005—2014 年实际观测的水质数据,本文分析溶解氧、化学需氧量、总氮、总磷及氟化物的年际变化特征,采用灰色模式识别模型对乌梁素海 2005—2014 年的水质状况进行评价,并结合乌梁素海的实际状况,分析乌梁素海水质变化的影响因素,以期更全面的了解乌梁素海水质变化规律及现状,为乌梁素海水污染治理及环境管理提供科学依据.

1 研究区概况

乌梁素海(40°36′~41°03′N,108°43′~108°57′E)位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内(图1),是全球同纬度最大的湖泊,中国八大淡水湖之一,2002年被国际湿地公约组织列为国际重要湿地. 乌梁素海所在地区属中温带大陆性季风气候,日照充足,雨水集中,流域多年平均气温5.2℃,历年平均日照时数3202h,流域多年平均降雨量在200~250mm之间,6—9月为丰水期,降雨占全年降雨量的80%左右. 根据2010年遥感卫片解译,乌梁素海南北长约35~40km,东西宽约5~10km,湖泊面积为366.08km²,其中仅177km²为开阔水域,剩余为天然及人工芦苇区;根据研究团队2014年实测数据分析,水深为1.1~2.77m,平均水深1.78m. 大约每年11月开始结冰,冰封期为5个月.

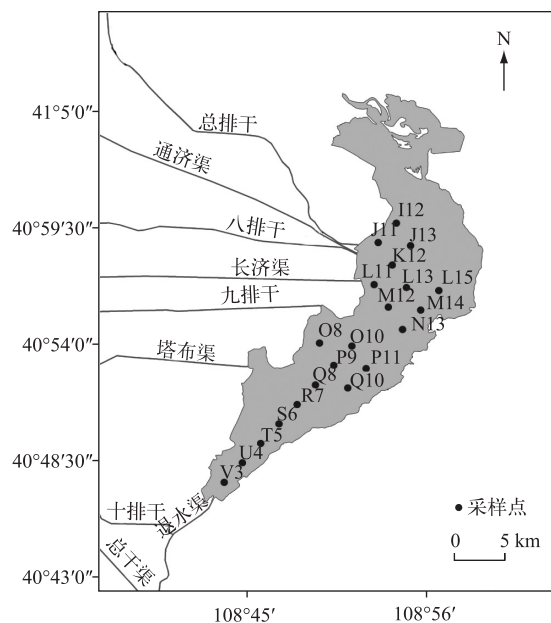


图1 乌梁素海地理位置及采样点分布

Fig.1 Geographical location and the distribution of sampling sites in Lake Wuliangsuhai

2 材料与方法

2.1 数据来源

水质监测及分析数据来源于乌梁素海 2005—2014 年常规水质指标的实测数据. 乌梁素海全湖共布设采样点 26 个,其中湖区采样点 21 个,周边排干采样点 5 个. 研究团队非冰封期取样时间为每年的 6—9 月,乌梁素海作为典型的寒区湖泊,有着不同于南方湖泊明显的季节变化特征,6—9 月恰为乌梁素海的非冰封期,也是湖泊污染物治理的关键时期. 因此,本文选取乌梁素海湖区 21 个采样点(图1)2005—2014 年 6—9

月的水质监测数据进行分析. 水质指标选取溶解氧(DO)、化学需氧量(COD_{Cr})、总氮(TN)、总磷(TP)及氟化物(F⁻). 乌梁素海流量数据来源于内蒙古河套灌区排水事业管理局红圪卜排水站.

2.2 水质分析方法

COD_{Cr}使用密封催化消解法(HZ-HJ-SZ-0108)测定, TN浓度使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894—1989)测定, TP浓度使用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)测定, DO浓度使用美国赛默飞世尔科技公司生产的便携式多参数测量仪(型号为:520M-01A)现场测定, F⁻使用美国赛默飞世尔科技公司生产的离子色谱仪(型号为:ICS-1100)测定.

2.3 水质评价灰色模式识别模型

1) 设有待分级评价的水质监测样本 j 个, 每个样本有 i 项污染指标监测值 C (mg/L), 根据水环境质量相关标准规定的 i 项指标评价等级数 k 和水质标准浓度值 S , 得到水质监测浓度矩阵(公式(1))和水质标准浓度矩阵(公式(2)):

$$C_{i \times j} = (c_{mn})_{i \times j} (m = 1, 2, \dots, i; n = 1, 2, \dots, j) \quad (1)$$

$$S_{i \times k} = (s_{mt})_{i \times k} (t = 1, 2, \dots, k) \quad (2)$$

式中, c_{mn} 为水质监测浓度矩阵中的某一元素; s_{mt} 为水质标准浓度矩阵中的某一元素.

2) 对数据做归一化处理. 由于在实际问题中, 各个水质指标的量纲可能不完全相同, 因此, 不能直接用原始数据进行计算, 有必要对水质监测浓度矩阵和水质标准浓度矩阵进行无量纲化处理, 使它们归一化为灰色模糊矩阵, 使矩阵的每个元素取值在 $[0, 1]$ 区间内, 因此规定, I类水水质标准浓度在模糊矩阵中对应的元素为 1, k 类水(最高类)水质标准浓度在模糊矩阵中对应的元素为 0. 具体方法:

对于 COD_{Cr}、TN 浓度越大, 污染程度越严重的指标, 可采用公式(3)和公式(4)来进行归一化:

$$ss_{mt} = (s_{mk} - s_{ml}) / (s_{mk} - s_{m1}) \quad (3)$$

$$cc_{mn} = \begin{cases} 1 & c_{mn} \leq s_{m1} \\ (s_{mk} - c_{mn}) / (s_{mk} - s_{m1}) & s_{m1} < c_{mn} < s_{mk} \\ 0 & c_{mn} \geq s_{mk} \end{cases} \quad (4)$$

对于像 DO 一样浓度越大, 污染程度越轻的指标, 可采用公式(5)和公式(6)来进行归一化:

$$ss_{mt} = (s_{ml} - s_{mk}) / (s_{m1} - s_{mk}) \quad (5)$$

$$cc_{mn} = \begin{cases} 1 & c_{mn} \geq s_{m1} \\ (c_{mn} - s_{mk}) / (s_{m1} - s_{mk}) & s_{m1} < c_{mn} < s_{mk} \\ 0 & c_{mn} \leq s_{mk} \end{cases} \quad (6)$$

式中, ss_{mt} 为归一化水质标准浓度矩阵; cc_{mn} 为归一化水质监测浓度矩阵.

3) 计算关联度及关联离散度. 对于第 n 个水体监测样本以向量 $cc_{1n}, cc_{2n}, \dots, cc_{in}$ ($n = 1, 2, \dots, j$) 作为参考序列(母序列), 以 k 级水质分级标准向量 $ss_{1t}, ss_{2t}, \dots, ss_{it}$ ($t = 1, 2, \dots, k$) 组成被比较序列(子序列)进行计算. 记 $\Delta_{nt}(m) = |cc_{mn} - ss_{mt}|$, 则 cc_{mn} 和 ss_{mt} 第 m 个指标的关联系数 $\xi_{nt}(m)$ 计算公式为:

$$\xi_{nt}(m) = \frac{\min_t \min_m \Delta_{nt}(m) + \rho \max_t \max_m \Delta_{nt}(m)}{\Delta_{nt}(m) + \rho \max_t \max_m \Delta_{nt}(m)} \quad (7)$$

式中, ρ 为分辨系数, $0 < \rho < 1$, 通常取 $\rho = 0.5$ ^[19]. 将关联系数用公式(8)加权集中得到关联度:

$$r_{nt} = \sum_{m=1}^i \lambda_m \cdot \xi_{nt}(m) \quad (8)$$

式中, r_{nt} 表示水体样本 n 与第 t 级水质标准之间的相似程度; λ_m 表示第 m 个评价指标的权重, 在实际处理过程中, 通常认为各评价指标具有相同的权重.

用关联度确定水质类别存在评价趋于均化, 分辨率低等不足之处, 为此引入关联离散度的概念, 使序列间的差异更为突出^[20].

$$r'_{nt} = (1 - r_{nt})^2 \quad (9)$$

4) 隶属度计算. 隶属度是样本从属于某一分类的度量, 从模糊集的角度出发可定为权重^[21]. 水体样本 n

与水质标准 t 之间的差异程度可以用隶属度为权重的加权关联离散度来表示. 本文参考陈守煜推导的最优分类隶属度矩阵^[21], 即最优 u_{nt} :

$$u_{nt} = 1 / (r_{nt}^2 \cdot \sum_{i=1}^k r_{ni}^{-2}) \quad (10)$$

5) 水质灰色识别模式综合指数. 为了更精确地评价水体水质状况, 引入水质评价灰色识别模式综合指数 (GC), 即将其所属水质类别 t 与其相应的隶属度 u_{nt} 加权平均, 计算公式为:

$$GC(n) = \sum_{t=1}^k t \cdot u_{nt} \quad (11)$$

式中, t 为水质标准级别, $t = 1, 2, \dots, k$.

3 结果与分析

3.1 水质指标的年际变化

3.1.1 DO 浓度的年际变化 DO 是衡量湖泊水体环境质量的重要指标之一, 是水体自净能力的重要标志, 对于维持水生生态系统的健康具有重要意义. 2005—2014 年间, 乌梁素海 DO 平均浓度变化范围为 4.15~8.30 mg/L, 平均值为 5.72 mg/L, 最小值出现在 2007 年, 最大值出现在 2014 年(图 2a). 乌梁素海 DO 平均浓度在 2005—2014 年间呈现显著增加的趋势. 2005—2008 年间, DO 浓度变化相对稳定在一个较低的水平, 2009 年以后, DO 浓度逐渐上升. 近十年来, 乌梁素海的 DO 平均浓度由 2005 年的 IV 类标准上升到 2014 年的 I 类标准, 平均值达到 III 类标准(GB 3828—2002), 水质状况明显好转.

3.1.2 COD_{Cr} 浓度的年际变化 COD_{Cr} 浓度的大小常被用来表征地表水所受到的有机污染的程度. COD_{Cr} 浓度过高, 会导致水体中 DO 浓度大幅下降, 对水生动植物的生长产生不利影响^[22]. 乌梁素海的 COD_{Cr} 主要来自于工厂废水的排放^[23]. 2005—2014 年间 COD_{Cr} 平均浓度变化范围为 23.88~104.93 mg/L, 平均值为 67.14 mg/L, 低于地表水环境质量标准中 V 类标准的限值, 为劣 V 类. 2005—2014 年乌梁素海 COD_{Cr} 平均浓度由 2005 年的 90.74 mg/L 下降到 2014 年的 23.88 mg/L, 十年间 COD_{Cr} 浓度下降了 70% 以上(图 2b), 降幅非常明显, 已达到国家规定水质标准的 IV 类水标准.

3.1.3 TN 浓度的年际变化 TN 是衡量水体富营养化的重要指标之一. 作为河套灌区生活污水的承泄地, 乌梁素海每年接纳的大量生活污水是其 TN 的主要来源^[23]. 2005—2014 年间, 乌梁素海 TN 平均浓度变化范围为 1.62~5.27 mg/L, 平均值为 3.27 mg/L, 最大值出现在 2005 年, 最小值出现在 2014 年(图 2c). 近十年间, 乌梁素海 TN 平均浓度整体呈现下降的趋势. 水质由十年前的劣 V 类标准, 上升到 2014 年接近 IV 类水标准, 转好趋势明显.

3.1.4 TP 浓度的年际变化 TP 是造成水体富营养化的另一个重要指标, 同时也是导致乌梁素海富营养化污染的限制性元素^[24]. 城镇生活污水及农田残留的大量磷及其化合物通过排干进入湖泊, 是乌梁素海磷元素的主要来源. 其中, 城镇生活污水的贡献率为 25.6%, 农田排水的贡献率为 23.2%, 两者的贡献率接近 50%^[23]. 2005—2014 年间, 乌梁素海 TP 平均浓度变化范围为 0.09~0.23 mg/L, 最大值出现在 2007 年, 最小值出现在 2010 年(图 2d). 乌梁素海 TP 浓度呈波动性变化, 近十年来没有显著下降, 平均值为 0.15 mg/L, 处于地表水环境质量标准的 IV 类水标准.

3.1.5 F⁻ 浓度的年际变化 F⁻ 在天然水体中广泛存在, 绿色植物吸收 F⁻ 后, 会使植物的光合作用受到抑制, 引起植物缺绿. 乌梁素海 2005—2014 年 F⁻ 平均浓度变化范围为 0.61~2.25 mg/L(图 2e), 2005—2011 年间并没有显著变化, 2012 年后, F⁻ 浓度急剧下降, 2013 年及 2014 年达到地表水环境质量标准的 I 类水标准. 近十年间, 乌梁素海 F⁻ 浓度由劣 V 类水质标准上升到 I 类水质标准, 变化十分明显.

3.2 水质综合分析与评价

根据乌梁素海 2005—2014 年 6、7、8、9 月 DO、COD_{Cr}、TN、TP 及 F⁻ 水质监测数据, 利用灰色模式识别模型对乌梁素海 2005—2014 年的水质进行综合分析与评价.

1) 首先构建水质监测浓度矩阵和水质标准浓度矩阵并做归一化处理:

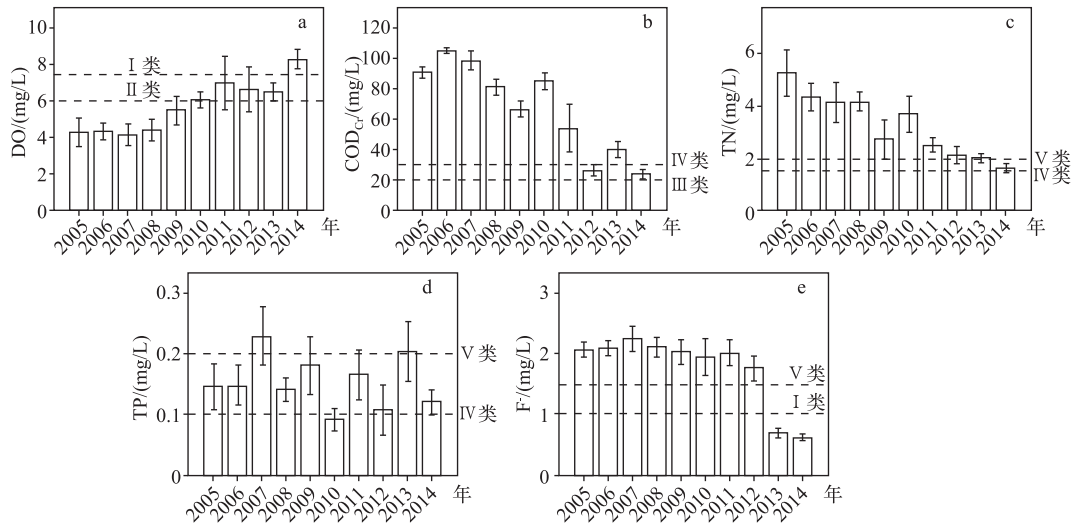


图 2 2005—2014 年乌梁素海各水质指标的年际变化

Fig.2 Water quality index interannual variation of Lake Wuliangsu from 2005 to 2014

$$CC_{5 \times 10} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0392 & 0.0004 & 0.2044 \\ 0.0526 & 0 & 0 & 0.1053 & 0 & 0.1579 & 0 & 0.4737 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4800 \\ 0.1273 & 0.1109 & 0.2473 & 0.2818 & 0.7345 & 0.8636 & 0.7636 & 0.6927 & 0.8600 & 0.8564 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$SS_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.800 & 0.400 & 0 \\ 1 & 0.921 & 0.789 & 0.526 & 0 \\ 1 & 0.833 & 0.556 & 0.278 & 0 \\ 1 & 0.727 & 0.545 & 0.182 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2) 计算关联度及关联离散度.利用公式(7)算得关联系数,采用公式(8)将关联系数加权得到关联度,最后计算得到乌梁素海 2005—2014 年水质对各级标准的关联离散度(表 1).

表 1 乌梁素海 2005—2014 年水质对各级标准的关联离散度

Tab.1 Standards at all levels correlation dispersion of water quality in Lake Wuliangsu from 2005 to 2014

年份	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
2005	0.433	0.394	0.327	0.077	0.004
2006	0.437	0.399	0.333	0.083	0.001
2007	0.427	0.383	0.312	0.079	0.004
2008	0.418	0.372	0.298	0.081	0.011
2009	0.363	0.275	0.291	0.131	0.014
2010	0.323	0.308	0.304	0.130	0.031
2011	0.357	0.286	0.297	0.137	0.015
2012	0.333	0.247	0.233	0.076	0.052
2013	0.197	0.185	0.183	0.261	0.068
2014	0.162	0.142	0.112	0.216	0.173

3) 计算隶属度及水质灰色识别模式综合指数.利用最优分类矩阵(公式(10))计算得到隶属度矩阵,将

隶属度矩阵中的元素与对应的水质类别加权平均得到乌梁素海 2005—2014 年水质灰色识别模式综合指数。采用综合指数对水质状况进行评价时, GC 最大值为 5, 最小值为 1. 当各指标均达到 I 类水要求时, $GC=1$; 当所有指标都超过或等于 V 类水要求时, $GC=5$.

2005—2011 年乌梁素海水质并没有明显变化(图 3), 水质灰色识别模式综合指数分别为 4.997、4.999、4.995、4.972、4.970、4.870、4.969, 水质类别处于较高水平, 水体受污染程度严重; 2012—2014 年, 水体水质类别逐年下降, 灰色识别模式综合指数分别为 4.496、4.166 和 2.832, 水体中污染物质浓度降低, 水质状况明显改善, 水体环境向良性方向发展.

4 讨论

根据乌梁素海 2005—2014 年各水质指标及水质变化综合分析结果可知, 除 TP 外, 各水质指标状况均有不同程度的改善, 乌梁素海的水质类别由 2005 年的接近 V 类水上升到 2014 年的 III 类水以上, 水质状况明显好转, 结合乌梁素海的实际状况分析, 引起水质状况改善的影响因素主要有以下几个方面:

1) 外源污染的削减. 在工业点源污染方面, 针对乌梁素海不断加剧的生态问题, 2006 年以来, 当地政府全力推进污水处理厂建设, 在 4 个工业园区和 7 个旗县区配套建设污水处理厂, 在所有 73 家重点排水企业配套建设污水处理措施, 关停流域内排污严重的造纸厂、调味厂等, 通过这些综合治理项目的实施, 使工厂污水及城镇生活废水中 COD_{Cr} 负荷量削减 17447 t/a, 氨氮 (NH_3-N) 负荷量削减 1221.29 t/a, TP 负荷量削减 159.14 t/a^[25], 使排入乌梁素海的污水得到有效控制. 在农田面源污染方面, 入湖污染主要受农业施肥量的影响, 小麦的氮、磷投入量要远远高于玉米、葵花等其他作物^[26]. 近年来, 河套灌区的种植结构发生明显变化, 由单一小麦种植结构演变成现今小麦、玉米、葵花的多元化种植结构^[27], 小麦种植面积的减少, 大大降低了氮肥、磷肥的施用量, 从而降低了农田面源污染的入湖量.

2) 入湖污染物负荷量的降低. 河套灌区的工业污水、城镇生活废水及农田退水最终汇入总排干, 由总排干排入乌梁素海, 而总排干排入乌梁素海的水量占乌梁素海年入湖水量的 70% 以上. 因此, 总排干污染物负荷量的高低对乌梁素海的水质状况有着重要影响. 以 2005—2014 年总排干 TN、 COD_{Cr} 及 TP 入湖量的年际变化为例(图 4), 近十年总排干 TN、TP 及 COD_{Cr} 入湖量均有不同程度的下降, 与 2005 年相比, 2014 年总排干 TN、TP 和 COD_{Cr} 入湖量分别下降了 21.4%、23.2% 和 22.8%. 外源污染的削减是导致入湖污染物负荷量降低的主要原因. 但近十年来湖泊 TP 浓度并没有显著下降, 沉积物中的磷向上覆水体释放是造成这种情况的主要原因. 乌梁素海全湖表层沉积物 TP 含量的平均值为 1067.47 mg/kg^[28], 高于太湖的 560.47 mg/kg^[29] 及鄱阳湖的 689.34 mg/kg^[30], 且乌梁素海的 pH 值为偏碱性, 均值介于 8~9 之间, 而湖泊水体 pH 值在夏、秋季节尤为高, 高 pH 值会造成沉积物中的磷向上覆水体的释放^[28], 从而使湖泊水体中 TP 浓度上升.

3) 入湖水量的增加. 各排干排入乌梁素海的水量是乌梁素海的主要补给来源之一. 当地政府从 2005 年

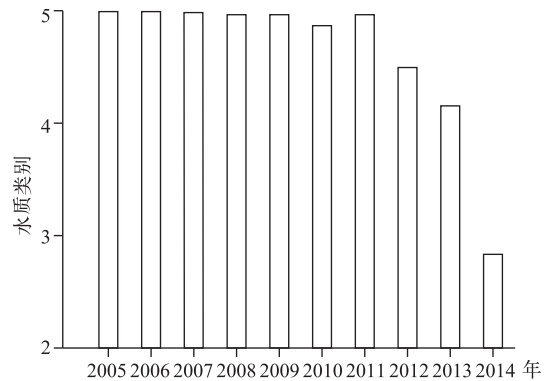


图 3 2005—2014 年乌梁素海水水质变化状况

Fig.3 The water quality variation situation of Lake Wuliangsu from 2005 to 2014

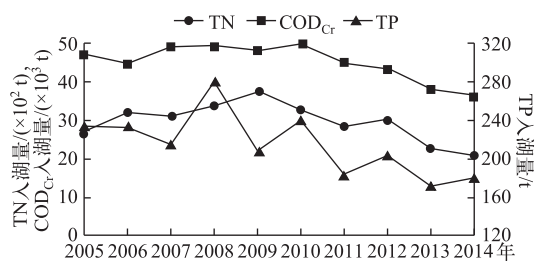


图 4 2005—2014 年总排干 TN、 COD_{Cr} 与 TP 入湖量的年际变化

Fig.4 TN, COD_{Cr} and TP interannual variation of total trunk from 2005 to 2014

起对乌梁素海实施生态补水工程,但由于各种条件限制,生态补水量并不明显. 2012年以来,生态补水进程开始加速,生态补水量大幅增加,这与乌梁素海水质状况变化的时间相一致. 2005—2014年各排干排入乌梁素海的水量分别为 3.45×10^8 、 4.22×10^8 、 5.06×10^8 、 6.13×10^8 、 4.98×10^8 、 5.85×10^8 、 5.23×10^8 、 7.78×10^8 、 6.32×10^8 和 $8.19 \times 10^8 \text{ m}^3$,入湖水量增加明显. 近十年来乌梁素海的水位稳定在 1019.5 m 上下,明水面积保持在 177 km^2 左右,而降雨量、蒸发量并未发生较大变化,从水量平衡的角度分析,入湖水量的大幅增加可以将乌梁素海原有的水体置换排出,而新水体所携带的污染物负荷量比原有水体低,这就使乌梁素海的水质得到改善.

5 结论

1) 2005—2014年间,乌梁素海 DO、 COD_{Cr} 、TN、TP 和 F^- 浓度存在显著的年际变化. DO 浓度大幅增加, COD_{Cr} 、TN 和 F^- 浓度均有不同程度的下降,但 TP 浓度并无明显下降.

2) 采用灰色模式识别模型对 2005—2014 年乌梁素海水质进行评价,水质灰色识别模式综合指数表明:乌梁素海水体环境正向良性方向发展,2012 年是乌梁素海水质变化的拐点,2012 年之前,乌梁素海水质没有明显变化;2012 年之后,水质得到明显改善.

3) TP 污染治理应作为现阶段乌梁素海水体污染治理的主要方面,为彻底改善乌梁素海水体质量,不仅要继续加强外源污染的削减,更要重视内源污染的治理. 在外源污染治理方面:控源减污,降低工厂污水及生活废水的排放量,减少灌区农药与磷肥的使用量,提高有机肥的利用效率. 在内源污染治理方面:通过环保疏浚和芦苇、沉水植物的收割,最大限度的减少内源污染. 同时继续进行生态补水工程,逐步恢复其水体自净能力,实现乌梁素海水环境的可持续发展.

6 参考文献

- [1] Li Genbao, Li Lin, Pan Min *et al.* The degradation cause and pattern characteristics of Lake Dianchi ecosystem and new restoration strategy of ecoregion and step-by-step implementation. *J Lake Sci*, 2014, **26**(4): 485-496 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2014.0401. [李根宝, 李林, 潘珉等. 滇池生态系统退化成因、格局特征与分区分步恢复策略. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 485-496.]
- [2] Dodds WK, Bouska WW, Eitzmann JL *et al.* Eutrophication of US freshwaters: Analysis of potential economic damages. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(1): 12-19.
- [3] Wu Chunfang, Xu Mingde, Li Lu *et al.* Model study on eutrophication control in Yingze Lake of Taiyuan city. *China Environmental Science*, 2014, **34**(2): 485-491 (in Chinese with English abstract). [武春芳, 徐明德, 李璐等. 太原市迎泽湖富营养化控制的模型研究. 中国环境科学, 2014, **34**(2): 485-491.]
- [4] Tsugeki NK, Agusa T, Ueda S *et al.* Eutrophication of mountain lakes in Japan due to increasing deposition of anthropogenically produced dust. *Ecological Research*, 2012, **27**(6): 1041-1052.
- [5] Xie Ting, Zhang Shujuan, Yang Ruiqiang. Research progress on the sedimentary records of persistent organic pollutants (POPs) in remote high mountain lakes. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(11): 1791-1801 (in Chinese with English abstract). [谢婷, 张淑娟, 杨瑞强. 偏远高山湖泊沉积物中持久性有机污染物的沉积记录研究. 环境化学, 2014, **33**(11): 1791-1801.]
- [6] Gao XY, Shi XR, Cui YB *et al.* Organic pollutants and ambient severity for the drinking water source of western Taihu Lake. *Ecotoxicology*, 2011, **20**(5SI): 959-967.
- [7] Lan Shubin, Wu Li, Zhang Delu *et al.* On the terrestrialization situation and its driving factors in Lake Nansi. *J Lake Sci*, 2011, **23**(4): 555-560 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2011.0410. [兰书斌, 吴丽, 张德禄等. 南四湖沼泽化现状及其驱动因素分析. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 555-560.]
- [8] Gu Xiaohong, Zhang Shengzhao, Bai Xiuling *et al.* Evolution of community structure of aquatic macrophytes in East Taihu Lake and its wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(7): 1541-1548 (in Chinese with English abstract). [谷孝鸿, 张圣照, 白秀玲等. 东太湖水生植物群落结构的演变及其沼泽化. 生态学报, 2005, **25**(7): 1541-1548.]
- [9] Liu Peipei, Bai Junhong, Zhao Qingqing *et al.* A review on terrestrialization and primary productivity of aquatic vegetations in lake ecosystems. *Wetland Science*, 2013, **11**(3): 392-397 (in Chinese with English abstract). [刘佩佩, 白军红, 赵

- 庆庆等. 湖泊沼泽化与水生植物初级生产力研究进展. *湿地科学*, 2013, **11**(3): 392-397.]
- [10] Li Xing, Yang Qiaomei, Gou Mangmang. Temporal and spatial distribution of water quality in Lake Wuliangsuhai, Inner Mongolia. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20**(8/9): 1301-1306(in Chinese with English abstract). [李兴, 杨乔媚, 勾芒芒. 内蒙古乌梁素海水质时空分布特征. *生态环境学报*, 2011, **20**(8/9): 1301-1306.]
- [11] Zhang Xiaojing, Li Changyou, Zhang Sheng *et al.* Distribution analysis of nutrient salt in the sediment of Lake Wuliangsuhai with respect to its effects on the environment. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(9): 1770-1776(in Chinese with English abstract). [张晓晶, 李畅游, 张生等. 乌梁素海表层沉积物营养盐的分布特征及环境意义. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(9): 1770-1776.]
- [12] Liang Xizhen, Li Changyou, Jia Keli *et al.* Simulation model for lake eutrophication control factor—total phosphorus in lake Wuliangsuhai. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, **24**(9): 189-191(in Chinese with English abstract). [梁喜珍, 李畅游, 贾克力等. 乌梁素海富营养化主控因子——总磷模拟模型研究. *干旱区资源与环境*, 2010, **24**(9): 189-191.]
- [13] Li Changyou, Zhao Shengnan, Zhang Sheng *et al.* Analysis of heavy metals sources and assessment in sediments of Ulansuhai Lake, China. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2012, **21**(12): 1-10.
- [14] Wang Shuang, Li Changyou, Shi Xiaohong *et al.* Heavy metal speciation and pollution evaluation in the sediments of Lake Wuliangsuhai. *Environmental Chemistry*, 2012, **31**(10): 1555-1561(in Chinese with English abstract). [王爽, 李畅游, 史小红等. 乌梁素海沉积物中重金属形态分布特征及污染状况评价. *环境化学*, 2012, **31**(10): 1555-1561.]
- [15] Wu Yun, Chao Lunbagen, Li Changyou *et al.* The spatial distribution characteristics of nutrient elements and heavy metals in surface sediments of Lake Wuliangsuhai. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, **25**(4): 143-148(in Chinese with English abstract). [乌云, 朝伦巴根, 李畅游等. 乌梁素海表层沉积物营养元素及重金属空间分布特征. *干旱区资源与环境*, 2011, **25**(4): 143-148.]
- [16] Zhang Yan, Li Changyou, Shi Xiaohong *et al.* The migration of total dissolved solids during natural freezing process in Ulansuhai Lake. *Journal of Arid Land*, 2012, **4**(1): 85-94.
- [17] Lü Hongzhou, Li Changyou, Shi Xiaohong *et al.* Pollutant distribution under different conditions in Lake Ulansuhai ice-water system. *J Lake Sci*, 2015, **27**(6): 1151-1158(in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2015.0621.[吕宏洲, 李畅游, 史小红等. 不同条件下乌梁素海污染物在冰-水体系中分布规律的模拟. *湖泊科学*, 2015, **27**(6): 1151-1158.]
- [18] Yin Linlin, Jia Keli, Shi Xiaohong *et al.* Atmospheric deposition characteristics and fluxes of heavy metals in Lake Ulansuhai. *J Lake Sci*, 2014, **26**(6): 931-938(in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2014.0616.[尹琳琳, 贾克力, 史小红等. 乌梁素海大气重金属沉降入湖通量初步估算. *湖泊科学*, 2014, **26**(6): 931-938.]
- [19] Zeng Guangming, Yang Chunping, Zeng Beiwei *et al.* A grey relational analysis method for overall environmental impact assessment. *China Environmental Science*, 1995, **15**(4): 247-251(in Chinese with English abstract). [曾光明, 杨春平, 曾北危. 环境影响综合评价的灰色关联分析方法. *中国环境科学*, 1995, **15**(4): 247-251.]
- [20] Zhang Junfang, Chen Miao, Luo Xue. Application research on grey-identification assessment for quality of water environment. *Journal of Guizhou University of Technology: Natural Science Edition*, 2003, **32**(4): 91-94(in Chinese with English abstract). [张军方, 陈淼, 罗雪. 灰色识别法在水环境质量评价中的应用研究. *贵州工业大学学报: 自然科学版*, 2003, **32**(4): 91-94.]
- [21] Chen Shouyu ed. *Water conservancy fuzzy set analysis of hydrology and water resources and environment*. Dalian: Dalian University Press, 1987: 52(in Chinese). [陈守煜. *水利水文水资源与环境模糊集分析*. 大连: 大连工学院出版社, 1987: 52.]
- [22] Wang Nina, Li Haofei, Deng Baojun *et al.* Investigation of mutual relations for COD, BOD and DO in Hanjiang River of Hanzhong. *Technology and Development of Chemical Industry*, 2011, **40**(3): 52-53(in Chinese with English abstract). [王妮娜, 李浩飞, 邓保君等. 汉江汉中段水体 COD、BOD 与 DO 相互关系的研究. *化工技术与开发*, 2011, **40**(3): 52-53.]
- [23] He Liansheng, Xi Beidou, Lei Hongjun *et al.* eds. *Study on comprehensive treatment planning in Wuliangsuhai*. Beijing: China Environmental Science Press, 2013(in Chinese). [何连生, 席北斗, 雷宏军等. *乌梁素海综合治理规划研究*. 北京: 中国环境出版社, 2013.]
- [24] Shi Xiaohong, Li Changyou, Jia Keli. Analysis of driving factors and status of pollution in a lake. *Environmental Science and*

- Technology*, 2007, **30**(4): 37-39(in Chinese with English abstract). [史小红, 李畅游, 贾克力. 乌梁素海污染现状及驱动因子分析. 环境科学与技术, 2007, **30**(4): 37-39.]
- [25] Zhou Yu. The Wuliangsuhai ecological research station building and health evaluation index system[Dissertation]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2012: 27.[周瑜. 乌梁素海生态研究站指标体系的构建与健康评价[学位论文]. 包头:内蒙古科技大学, 2012: 27.]
- [26] Liu Zhenying, Li Yawei, Li Junfeng *et al.* Agricultural non-point source pollution in Wuliangsuhai Valley. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(1): 41-44(in Chinese with English abstract). [刘振英, 李亚威, 李俊峰等. 乌梁素河流域农田面源污染研究. 农业环境科学学报, 2007, **26**(1): 41-44.]
- [27] Li Zeming, Wei Zhanmin, Bai Yanying *et al.* Spatiotemporal evolution of planting area and planting structure in the irrigated areas along the Yellow River in Inner Mongolia. *Arid Zone Research*, 2014, **31**(2): 348-354(in Chinese with English abstract). [李泽鸣, 魏占民, 白燕英等. 内蒙古引黄灌区种植面积与种植结构的时空演变. 干旱区研究, 2014, **31**(2): 348-354.]
- [28] Li Changyou, Shi Xiaohong eds. The study of Lake Wuliangsuhai sediment environmental geochemistry. Beijing: Science Press, 2014.[李畅游, 史小红. 乌梁素海沉积物环境地球化学特征研究. 北京:科学出版社, 2014.]
- [29] Yuan Hezhong, Shen Ji, Liu Enfeng *et al.* Space distribution characteristics and diversity analysis of phosphorus from overlying water and surface sediments in Taihu Lake. *Environmental Science*, 2010, **31**(4): 954-960(in Chinese with English abstract). [袁和忠, 沈吉, 刘恩峰等. 太湖水体及表层沉积物磷空间分布特征及差异性分析. 环境科学, 2010, **31**(4): 954-960.]
- [30] Xiang Sulin, Zhou Wenbin. Phosphorus existing forms and distribution characteristic in Lake Poyang sediments. *J Lake Sci*, 2010, **22**(5): 649-654(in Chinese with English abstract). DOI:10.18307/2010.0504.[向速林, 周文斌. 鄱阳湖沉积物中磷的赋存形态及分布特征. 湖泊科学, 2010, **22**(5): 649-654.]