

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.05.012

乌梁素海浅水湖泊沼泽化现状及成因分析

朱永华^{1,2}, 张生¹, 赵胜男¹, 田清起¹, 韩志明¹, 胡建峰²

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古锡林郭勒盟水文勘测局, 内蒙古 锡林浩特 026000)

摘要:为揭示乌梁素海面临的湖泊沼泽化问题与其驱动因素,针对2013年8月乌梁素海浅水湖泊沼泽化现状及成因,进行了实地勘查和采样,利用基于植物生物量与沉积速率、植物种类和泥深的2种评价方法进行分析。结果表明:乌梁素海沼泽化程度存在空间差异,部分区域属于沼泽化后期,分别分布在总排干入湖口处和湖区的中东部,其中,沼泽化综合指数在近入湖口处各点最大,沼泽化综合指数处于3~4,向湖区中东部逐渐减小,但仍然大于湖区中南部的下游区,该区域的沼泽化综合指标数为2~3,仍属于沼泽化盛期,直至湖区下游的最南端,属湖泊沼泽化不显著区。造成乌梁素海浅水湖泊沼泽化的主要原因很可能是在湖水流速缓慢和富营养化的综合作用下,外源物质淤积和水生植物蔓延,淤积物质和植物残体逐年累积形成底泥泥炭,随着泥炭的增厚和湖水变浅,从而演化为沼泽。

关键词:浅水湖泊; 沼泽化; 成因分析; 富营养化; 乌梁素海

中图分类号:X524

文献标识码:A

文章编号:1004-6933(2017)05-0069-06

Analysis of shallow water lake bogginess and causes in Lake Wuliangsu

ZHU Yonghua^{1,2}, ZHANG Sheng¹, ZHAO Shengnan¹, TIAN Qingqi¹, HAN Zhiming¹, HU Jianfeng²

(1. *Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China*; 2. *Xilinguole Meng Hydrological Survey Bureau of Inner Mongolia, Xilinhot 026000, China*)

Abstract: In order to comprehend the terrestrialization situation and its driving factors in Lake Wuliangsu. 17 sampling points of Lake Wuliangsu were sampled and investigated in August 2013. The results showed that; two different evaluation methods for the area had the same results, but the comprehensive index which be acquired by the method based on biomass and deposition rate was slightly lower than the value which be acquired by the method based on species of plants and mud deep; Spatial differences exist Lake Wuliangsu swamp degree: nearly estuary points > eastern lake points > lake downstream points. The composite index of estuary and lake at the eastern is between 3-4, belonging to the latter part of the swamp; The composite index of lake downstream is between 2-3, belonging to swamping peak, S6 and T5 which were not having swamp problems. Wuliangsuhai swampy lake rooted exogenous substance causing siltation darken and raising levels of nutrition, the main driving factors of the acceleration of the swamp is irrational human activities.

Key words: shallow lake; lake bogginess; causes analysis; eutrophication; Lake Wuliangsu

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201501031);呼和浩特市科技计划项目(2015-社-4-1)

作者简介:朱永华(1986—),男,博士研究生,主要从事农业水资源利用与保护研究。E-mail:zyh332@163.com

通信作者:张生,教授。E-mail:shengzhang@imau.edu.cn

湖泊生态环境主要面临水环境恶化、生态系统退化和湖泊沼泽化等问题。湖泊沼泽化是湖泊衰老消亡的最后阶段,表现为湖泊淤积变浅、大量水生植物生长和埋藏、发展成为沼泽的过程。我国东太湖目前正处于沼泽化盛期,东部滨岸区与南部沿岸区处于沼泽化前期^[1],而且东太湖沼泽化呈加速发展趋势,污染加剧和过度的网围养殖是沼泽化加速的主要影响因素^[2]。南四湖(微山湖、昭阳湖、独山湖与南阳湖)已有 90% 的调查区域处于沼泽化阶段,50% 的区域处于重度及以上的沼泽化阶段,导致这一结果的主要原因为外源污染物输入和不断升高的湖泊富营养化水平^[3]。乌梁素海属于草-藻混合型的浅水湖泊,其富营养化较严重^[4-9],本文通过实地勘查和采样分析,应用基于植物生物量与沉积速率、植物种类与泥深的 2 种沼泽化评价方法,对乌梁素海进行分区沼泽化定量评价和讨论,并结合水体营养化、沉积速率、水动力学等因素,分析其沼泽化演变趋势,阐明沼泽化驱动因素,以期为建设生态和谐的乌梁素海提供科学数据与理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌梁素海位于内蒙古巴盟后套平原东端,108°43'E ~ 108°57'E,40°36'N ~ 41°03'N,水面面积为 293 km²,芦苇区面积为 118.97 km²,明水区面积为 111.13 km²,明水区中 85.7 km² 为沉水植物密集区。湖水于每年 11 月初结冰,翌年 3 月末到 4 月初开始融化,冰封期 5 个月左右。多年平均气温为 7.3℃,全年日照时数为 3 185.5 h,多年平均降雨量为 224 mm,蒸发量 1 502 mm,气温差异明显。由于农药、化肥等在河套灌区的用量不断增加,同时化肥利用率仅为 30% 左右,上游工业废水、生活污水伴同大量流失化肥的农田排水经不同的排水沟进入乌梁素海,使乌梁素海生态环境遭到严重破坏。

1.2 样品采集

根据乌梁素海实地情况,共布设水体植被采样监测点 17 个(图 1)。2013 年 8 月进行观察采样,通过 GPS 定位各个采样点,对其湖沼学特征进行现场测定。水生植物类型及生物量数据主要来源于内蒙古农业大学湖泊研究团队历年调查数据与国家自然科学基金(30070149, 30230090)和中国科学院知识创新项目(KZCX2405, KZCX1 SW-01-17)研究成果^[10]。湖区沉积速率参考中国地质调查局“内蒙古河套农业经济区生态地球化学调查”项目成果^[12],水深数据来源于 2004—2008 年内蒙古农业大学乌梁素海生态定位站历年监测资料。同时,采

用塞氏盘测定透明度(SD),采用竹竿法测定水深与泥深,表层水利用自制采水器采集,将装入聚丙烯瓶中避光密封低温保存的水样带回实验室,参照《湖泊富营养化规范》和《水和废水监测分析方法》测定 Chl-a 及 TP 指标值。

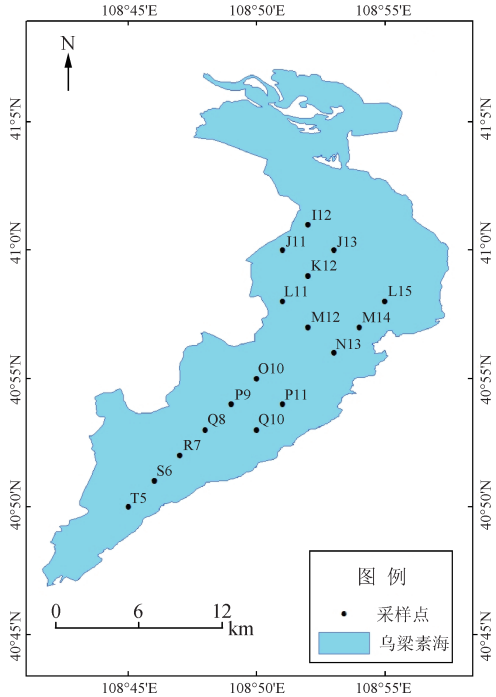


图 1 采样点位置

1.3 沼泽化评价方法

选取植物指标与淤积指标作为评价指标,借鉴植被为主、促淤效应为辅的评价原则,采用 2 种不同的评价方法并对结果进行分析对比。

1.3.1 基于植物生物量与沉积速率的评价方法

朱金格等^[1]在太湖的研究中选定沼泽化综合指数为

$$I_c = I_v + I_s \quad (1)$$

其中

$$I_v = T_m + B_m \quad (2)$$

式中: I_c 为沼泽化综合指数, $I_c = [1, 2)$ 为沼泽化前期, $I_c = [2, 3)$ 为沼泽化盛期, $I_c = [3, 4]$ 为沼泽化后期; I_v 为植被指标; I_s 为潜积指标; B_m 为生物量指数; T_m 为植被指数,并依据植被类型分为以下 4 个基本级别:当水生植物以挺水植物为主时, $T_m = 1.5$;当以浮叶植物为主时, $T_m = 1.0$;当以沉水植物为主时, $T_m = 0.5$;当没有大型植物时, $T_m = 0$ 。

根据乌梁素海实际观察情况,确定其湖泊水生植物主要分为挺水植物和沉水植物 2 种类型。因此,根据中科院段晓男等^[10-11]的研究成果,以芦苇生物量(6.81 kg/m²)和龙须眼子菜生物量(0.88 kg/m²)作为标准量 1,对研究区芦苇生物量进行线性内插得出其生物量对应的生物量指数 B_m 值,对龙须眼子菜生物量以其平均生物量替代,对应生物量指数

B_m 为 1.0。其中野生芦苇生物量基于单环境因素进行回归计算, 运用以芦苇的生物量为因变量、以 TN 与净水深为自变量的线性模型, 分析得出研究区不同采样点野生芦苇地上生物量 B_G 、地下生物量 B_{UG} 与总生物量 B_m , 即:

$$B_G = 0.194 + 1.055D + 0.479\rho_{TN} \quad (3)$$

$$B_{UG} = -0.637D + 2.179 \quad (4)$$

$$B_m = B_G + B_{UG} \quad (5)$$

式中: D 为采样点净水深, m; ρ_{TN} 为采样点 TN 的质量浓度, mg/L。

I_s 为淤积指标, 以相对沉积速率 V_s/D 表示, 即用沉积速率 V_s 与水深 D 比值结果进行线性内插得出。朱金格等^[1] 认为东太湖近 20 年淤积严重, 其相对沉积速率 8.73 明显大于我国主要浅水湖泊, 因此, 将其作为淤积指标标准值, 定义为 1。

1.3.2 基于植物种类与泥深的评价方法

兰书斌等^[3] 对南四湖的研究中选定沼泽化综合指数为

$$S_{zzh} = V_{zzh} + D_{zzh} \quad (6)$$

式中: S_{zzh} 为沼泽化综合指数。

$S_{zzh} = [1, 2)$ 为轻度沼泽化, $S_{zzh} = [2, 3)$ 为中度沼泽化, $S_{zzh} = [3, 4]$ 为重度沼泽化。

水生植物分别为挺水植物、浮叶植物、沉水植物和无水生植物, 对应的植被指标 V_{zzh} 分别为 3、2、1 和 0。

$$D_{zzh} = (h - h_1)/(h_2 - h_1) \quad (7)$$

式中: h_1 与 h_2 分别为实测最小和最大淤泥深度; h 为采样点的实测淤泥深度, m。

2 结果与讨论

2.1 研究区植被状况

2013 年 8 月, 对乌梁素海植被实际情况进行野外调查, 植被种类见表 1。

表 1 乌梁素海调查样点植被种类

测点名称	主要植被	测点名称	主要植被
I12	芦苇	O10	芦苇
J11	芦苇	P9	芦苇、龙须眼子菜
J13	芦苇、龙须眼子菜	P11	芦苇、龙须眼子菜
K12	芦苇、龙须眼子菜	Q8	龙须眼子菜
L11	芦苇	Q10	龙须眼子菜
L15	芦苇、龙须眼子菜	R7	芦苇、龙须眼子菜
M12	芦苇、龙须眼子菜	S6	无大型植物
M14	芦苇、龙须眼子菜	T5	无大型植物
N13	芦苇、龙须眼子菜		

由表 1 可知, 乌梁素海湖区各种水生植物相间分布, 且无规律分布, 使得湖区呈现生态环境复杂化。表 1 中, I12、L11、J11、J13、K12 和 M12 处于近入湖口处; Q8、Q10、R7、S6 和 T5 处于湖区下游; L15、N13 和 M14 处于湖区东部; O10、P9 和 P11 处

于湖中部。

2.2 基于植物生物量与沉积速率评价的结果

根据乌梁素海的现有实测数据, 采用基于植物生物量与沉积速率的评价方法, 分析湖区 17 个采样点沼泽化状况。

由表 1 中主要植被分布情况可得出全湖植被指标中 T_m 大部分为 1.5, 挺水植物占优势; Q8 和 Q10 的 T_m 为 0.5, 优势植被为沉水植物; S6 和 T5 的 T_m 为 0, 无大型植物。首先通过式(3)~(5)计算得出乌梁素海野生芦苇地上、地下生物量及总生物量, 再进行线性内插得出相对应的生物量指数 B_m 值, 其中, P9、Q8 和 Q10 点生物量值最大, B_m 为 1.0; S6 和 T5 由于无水生植被, 生物量最小, B_m 为 0; 其余各个采样点 B_m 值变化幅度不大, 其值为 0.81~0.99, 均值为 0.88。

植被指标由 T_m 和 B_m 组成, 经叠加计算可知其变化趋势与 T_m 相似, 主要受 T_m 影响较大。除去 S6 和 T5 无水生植被, 其值为 0 以外, Q8 和 Q10 主要植被类型不同于其他各点, 为龙须眼子菜, 其值小于其他个点, 为 1.5, 其他个点植被指标值变化范围为 2.27~2.50。 I_v 、 T_m 与 B_m 变化见图 2。

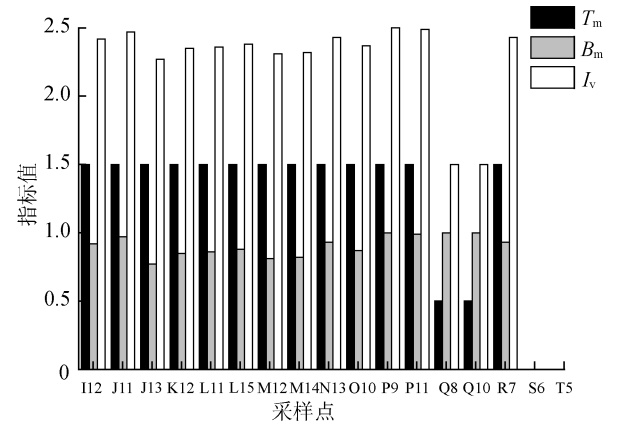


图 2 基于植物生物量与沉积速率评价方法植被指标

赵锁志等^[12] 用 210Pb、137Cs 测年对乌梁素海柱状沉积物样品进行分析, 得出其沉积速率与时间相关性显著, 并计算 2013 年乌梁素海现代沉积物的沉积速率。由于沉积物淤积厚度在年内变化不显著, 研究区面积相对较小, 故本文各个采样点全部采用 2013 年平均沉积速率 V_s 为 11.1 mm/a。计算 V_s 与乌梁素海各个采样点实测净水深 D 比值, 并以太湖相对沉积速率 8.73 作为评价区淤积指标标准最大值 1, 对 V_s/D 各个比值进行线性插值, 得出研究区不同采样点的淤积指标(图 3)。

不同采样点沼泽化程度存在明显空间差异(图 4)。结合淤积指标标准值, L11 处相对沉积速率和淤积指标最大, 分别为 8.10 和 0.93; T5 和 S6 处淤积指标较小, 分别为 0.42 和 0.52。

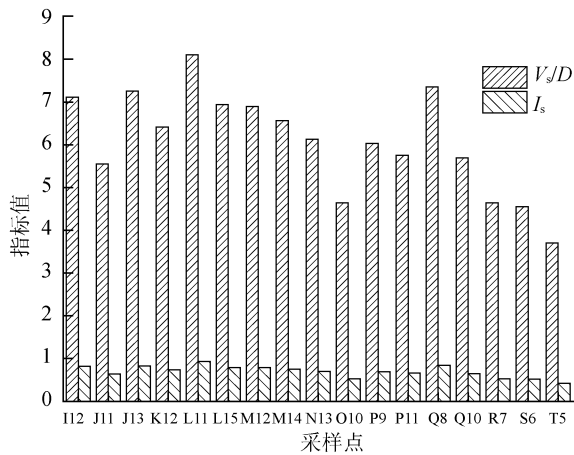


图3 基于植物生物量与沉积速率评价方法淤积指标

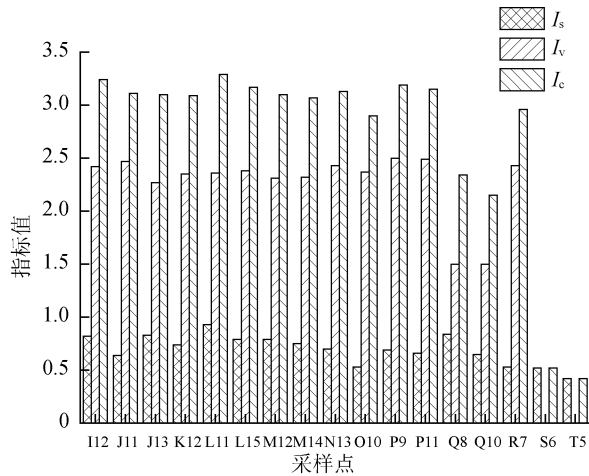


图4 基于植物生物量与沉积速率评价方法综合指标

由图5可知,近入湖口处各点沼泽化综合指标值最大(3.09~3.24),湖中东部各点沼泽化综合指标值次之(2.90~3.19),湖区下游各点沼泽化综合指标值最小(0.42~2.96)。乌梁素海入湖口处与湖中东部沼泽化综合指数整体都较高,处于沼泽化后期;湖区下游处于沼泽化盛期;S6和T5不存在沼泽化问题。乌梁素海沼泽化正由北方的入湖口逐渐向南方的下游发展,变化趋势显著。

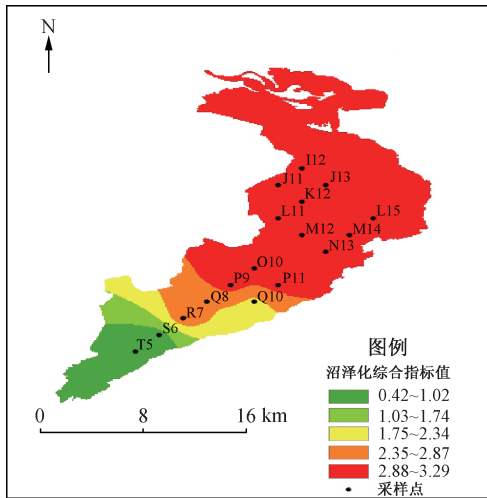


图5 基于植物生物量与沉积速率评价方法沼泽化分布

2.3 基于植物种类与泥深评价结果

根据乌梁素海的现有实测数据,采用基于植物种类与泥深的评价方法,对湖区17个采样点进行沼泽化分析。由表1中主要植被分布情况可得出全湖大部分采样点植被指标 V_{zsh} 值为3.0,挺水植物占优势;Q8和Q10的 V_{zsh} 值为2.0,沉水植物占优势;S6和T5的 V_{zsh} 值为0,无大型植物。通过淤积指标 D_{zsh} 计算公式可以知道,采样点净水深值越大,其 D_{zsh} 值越大,呈正比例关系。采样点J13与J11分别为净水深最大值与最小值处,其对应的 D_{zsh} 值分别为1和0;其余各采样点水深不同, D_{zsh} 值也不同,变化幅度较为明显,均值为0.52。具体评价指标详见图6。

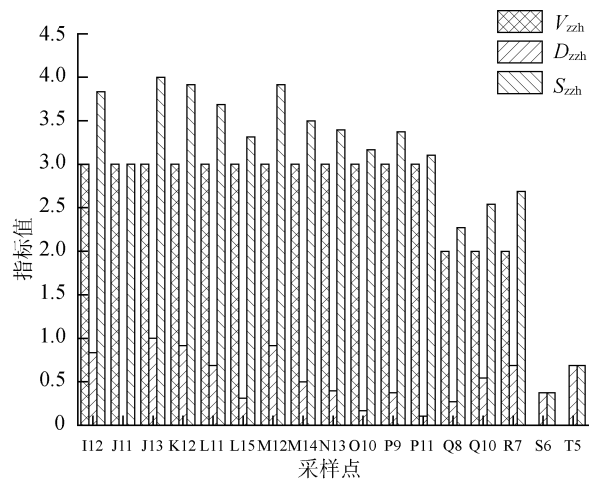


图6 基于植物种类与泥深评价方法综合指标

由图7可知,乌梁素海各个采样点沼泽化程度存在明显的空间差异:近入湖口处各点沼泽化综合指标值(3.69~4.00)大于湖中东部各点沼泽化综合指标值(3.10~3.50)大于湖区下游各点沼泽化综合指标值(0.38~2.69)。乌梁素海入湖口处与湖中东部沼泽化综合指数整体都较高,处于重度沼泽化;湖区下游处于中度沼泽化;S6和T5处于未沼泽化期;沼泽化程度整体呈由北向南发展的趋势。

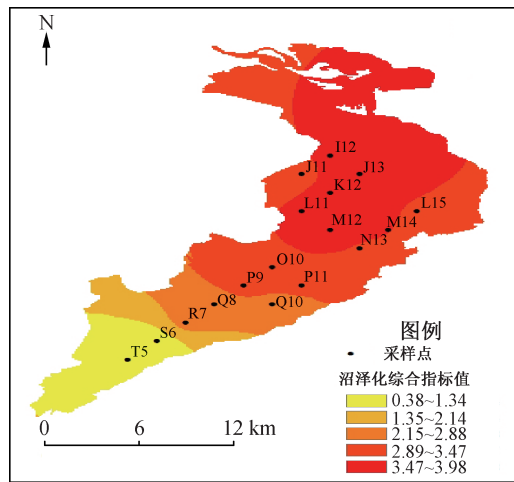


图7 基于植物种类与泥深评价方法沼泽化分布

2.4 两种评价方法对比分析

通过评价结果可知,基于植物生物量与沉积速率的评价价值略低于基于植物种类与泥深评价方法的综合指标数值,主要是考虑到湖泊沼泽化加速的原因与水生植物生物量存在直接关系,即与其残体在湖底的堆积量与分解量存在明显联系。对于研究区不同的水深部位,沉积速率对沼泽化程度也有一定的影响作用;基于植物种类与泥深评价方法结果偏大,主要由于植物指标所占权重较大,且只考虑植被种类,考虑因素单一;而基于植物生物量与沉积速率评价方法在植物指标计算中引入了生物量计算,相对减少了其在综合指标中的权重;并在淤积指标计算中也引入了沉积速率环境因素。虽然由于研究区的实际情况,本文所有采样点均采用平均值,但对于沼泽化程度精度提高有一定作用。对于沼泽化评价方法在乌梁素海的建立,还应进一步完善,从而探索适应本研究区的评价方法。

通过分析对比两种不同评价方法的评价结果,可知乌梁素海沼泽化评价结果大致相同,即乌梁素海入湖口处与湖中东部沼泽化综合指数整体都较高,处于重度沼泽化或沼泽化后期,这与入湖口处水流流速与流量较大、挺水植物密集、湖中东部水流基本静止、水体交换能力差、挺水植物密度适中、水下时有植物覆盖有关;湖区下游处于中度沼泽化和沼泽化盛期,与水流缓、挺水植物稀少,或水域开阔、水面无植物覆盖、沉水植物较多有关;S6 和 T5 处于草鱼渔场范围内,水生植物几乎没有,所以不存在沼泽化问题。

2.5 沼泽化驱动因素分析

2.5.1 外源污染增加和营养水平提高

属于草-藻型浅水湖泊的乌梁素海是当地农田退水、工业废水和生活污水的唯一承泄渠道。每年大约有 5 亿 m³ 的农田退水,2 亿 m³ 的工业废水、生活污水携带着营养元素等排入乌梁素海。据调查,每年约有 91 t TP (城市 50%、工业 15%、农业 35%),2000 t TN (城市 15%、工业 35%、农业 50%) 以及 2 万 t COD (城市 10%、工业 25%、农业 65%) 通过各排干进入乌梁素海,使得乌梁素海处于重度富营养化状态(图 8)。

乌梁素海各个采样点营养化较为严重。湖泊富营养化一方面会导致藻类暴发,生态系统遭到破坏;另一方面,营养物质过剩导致水生植物和湿生植物不断生长,大量有机生物残体不断沉入湖底堆积起来变成泥炭,加之泥沙的淤积,水深变浅,湖面缩小,直至逐渐消失,导致湖泊沼泽化。

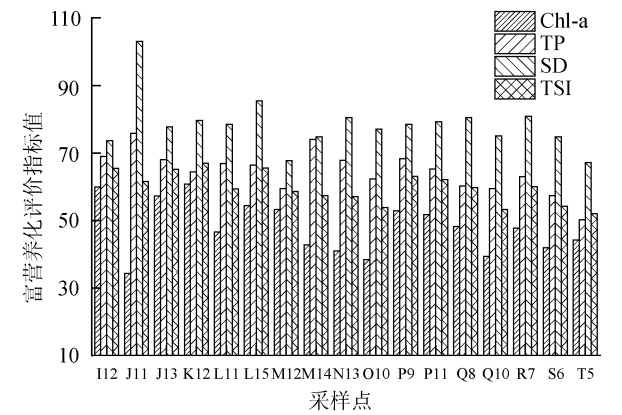


图8 采样点各指标富营养化指标

2.5.2 挺水植被扩张

乌梁素海包含水生植物共 6 科 6 属 11 种,是内蒙古河套灌区重要的芦苇生产和加工基地。水中挺水植物和沉水植物几乎分布全湖;芦苇年产量约为十万吨,作为挺水植物优势种群,其面积约占整个乌梁素海湖面的 1/2 以上;在明水区域中,几乎布满了沉水植物,以龙须眼子菜为优势种群。推动乌梁素海水生植被演替的主要自然因素是营养物质的积累;收割、围栏养殖等人类活动均能在一定程度上改变水生植被的演替方向和速度。挺水植物和沉水植物分布范围的加速扩张也是促进湖泊沼泽化程度加剧的因素之一。

2.5.3 水动力变动加快局部泥沙淤积

湖泊淤积是造成许多湖泊消亡的重要因素之一。受各种因素影响,诸如湖泊地形、河流、水深、水动力条件及入湖河道位置等,乌梁素海湖底沉积作用明显。梁文等^[13-15]认为近 50 年的乌梁素海底泥沉积范围在 200 ~ 900 mm 内变化,沉积速率由 20 世纪 70 年代的 5.9 mm/a 逐渐增加,到 21 世纪初期,已达到 10.7 mm/a。

3 结 论

- a. 两种不同的评价方法对评价区沼泽化状况评价结果基本相同,由于考虑的因素不同,基于植物生物量与沉积速率评价方法综合指标值略低于基于植物种类与泥深评价方法的综合指标值。
- b. 乌梁素海各个采样点沼泽化程度存在明显空间差异:近入湖口处各点沼泽化综合指标值大于湖中东部各点沼泽化综合指标值大于湖区下游各点沼泽化综合指标值。乌梁素海入湖口处与湖中东部沼泽化综合指数值整体都较高,沼泽化综合指标数都处于 3 ~ 4,属于沼泽化后期;湖区下游各点沼泽化综合指标数处于 2 ~ 3,属于沼泽化盛期;S6 和 T5 不存在沼泽化问题。
- c. 乌梁素海作为当地农田退水、工业废水和生

活污水的唯一承泄渠道, 容纳大量的泥沙和营养物质, 这使得乌梁素海沼泽化问题渐趋严重, 并且呈现加速发展的趋势。因此, 迫切需要采取有效措施缓解这一严重的生态问题。

参考文献:

[1] 朱金格, 张晓姣, 胡维平. 太湖沼泽化评价方法的建立及应用[J]. 环境科学学报, 2010, 30(8): 1695-1699. (ZHU Jing, ZHANG Xiaojiao, HU Weiping. A method for assessing the swamping of Lake Taihu and its application [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(8): 1695-1699. (in Chinese))

[2] 吴庆龙, 胡耀辉, 李文朝, 等. 东太湖沼泽化发展趋势及驱动因素分析[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 275-279. (WU Qinglong, HU Yaohui, LI Wenchao, et al. Tendency of swampiness of east Taihu Lake and its causes [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(3): 275-279. (in Chinese))

[3] 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[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4): 555-560. (LAN Shubin, WU Li, ZHANG Delu, et al. On the terrestrialization situation and its driving factors in Nansi Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(4): 555-560. (in Chinese))

[4] 李畅游, 刘廷玺, 高瑞忠, 等. 乌梁素海富营养化主控因子年季变化分析及综合评价[J]. 水文, 2004, 24(3): 14-17. (LI Changyou, LIU Tingxi, GAO Ruizhong, et al. Study and synthetic assessment for the season-year change of the eutrophication main control factors in Wuliangsuhai Lake [J]. Journal of China Hydrology, 2004, 24(3): 14-17. (in Chinese))

[5] 任春涛, 李畅游, 全占军, 等. 基于 GIS 的乌梁素海水体富营养化状况的模糊模式识别[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 68-74. (REN Chuntao, LI Changyou, QUAN Zhanjun, et al. Fuzzy pattern recognition to water trophic grade in Wuliangsuhai Lake base on GIS [J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(3): 68-74. (in Chinese))

[6] 于玲红, 吕超, 李卫平. 冰封期乌梁素海冰层中营养盐垂直分布特征分析[J]. 环境工程, 2013(增刊1): 170-174. (YU Linghong, LYU Chao, LI Weiping. Analysis of vertical distribution of nutrient salts in ice of Wuliangsuhai ice closed period [J]. Environmental Engineering, 2013 (sup1): 170-174. (in Chinese))

[7] 李兴, 李畅游, 李卫平, 等. 内蒙古乌梁素海不同形态氮的时空分布[J]. 湖泊科学, 2009, 21(6): 885-890. (LI Xing, LI Changyou, LI Weiping, et al. Temporal and spatial distribution of different species of nitrogen in Wuliangsuhai Lake, Inner Mongolia [J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(6): 885-890. (in Chinese))

[8] 蔺照兰, 王汝南, 王春梅. 基于基尼系数的乌梁素海流域污染负荷分配[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(9):

19-24. (LIN Zhaolan, WANG Runan, WANG Chunmei. Study on the distribution of water pollutants in Wuliangsu Lake Basin based on environmental Gini coefficient [J]. Environmental Pollution & Control, 2011, 33(9): 19-24. (in Chinese))

[9] 梁文, 张生, 李畅游, 等. 污染水体沉积物营养盐释放过程[J]. 环境化学, 2011, 30(10): 1718-1724. (LIANG Wen, ZHANG Sheng, LI Changyou, et al. Release processes of nutrients from the sediment under contaminated water bodies [J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(10): 1718-1724. (in Chinese))

[10] 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[J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 246-251. (DUAN Xiaonan, WANG Xiaoke, OUYANG Zhiyun, et al. The biomass of phragmites australis and its influencing factors in Wuliangsu Lake [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(2): 246-251. (in Chinese))

[11] 康志文, 童伟, 王云霞, 等. 乌梁素海生态系统结构与功能变化趋势分析[J]. 北方环境, 2012, 27(5): 74-78. (KANG Zhiwen, TONG Wei, WANG Yunxia, et al. Trend analysis of Wuliangsuhai ecosystem structure and function [J]. Northern Environment, 2012, 27(5): 74-78. (in Chinese))

[12] 赵锁志, 孔凡吉, 王喜宽, 等. 内蒙古乌梁素海 210Pb 和 137Cs 测年与现代沉积速率[J]. 现代地质, 2008, 22(6): 909-914. (ZHAO Suozhi, KONG Fanji, WANG Xikuan, et al. 210Pb and 137Cs dating and modern sedimentation rate on the Wuliangsu Lake of Inner Mongolia [J]. Geoscience, 2008, 22(6): 909-914. (in Chinese))

[13] 梁文, 张生, 李畅游, 等. 乌梁素海沉积物分布特征[J]. 环境化学, 2011, 30(9): 1678-1679. (LIANG Wen, ZHANG Sheng, LI Changyou, et al. Distribution characteristics of sediments in Wuliangsu Lake [J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(9): 1678-1679. (in Chinese))

[14] 刘旭, 李畅游, 贾克力, 等. 北方干旱区湖泊湿地沉积物有机碳分布及碳储量特征研究: 以乌梁素海为例[J]. 生态环境学报, 2013(2): 319-324. (LIU Xu, LI Changyou, JIA Keli, et al. Spatial distribution and storage characteristic of organic carbon in sediments of lake wetland in northern arid areas: a case study of Wuliangsuhai Lake [J]. Ecology and Environment Sciences, 2013(2): 319-324. (in Chinese))

[15] 马龙, 吴敬禄, 温军会, 等. 乌梁素海湖泊沉积物粒度特征及其环境指示意义[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 646-652. (MA Long, WU Jinglu, WEN Junhui, et al. Grain size characteristics and its environmental significance of lacustrine sediment recorded in Wuliangsu Lake [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 646-652. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-11-30 编辑: 徐娟)