

乌梁素海湿地环境的演变

于瑞宏¹, 李畅游², 刘廷玺², 许有鹏¹

(1. 南京大学城市与资源学系, 南京 210093;

2. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 利用遥感原理对乌梁素海 1986 年以来湿地环境的演变进行分析, 指出近 17 年来乌梁素海总水域面积呈增加趋势; 明水区面积 1987 年以前趋势增加, 到 1996 年趋势减少, 至 2002 年又趋势增加; 密集水草区面积与明水区面积变化特征基本相反; 芦苇区面积 1987 年以前趋势减少, 而后趋势增加; 浅水区和沼泽区面积的总趋势尽管微弱增加, 但变化基本平稳; 1988 年开始种植人工芦苇, 其面积呈逐年上升趋势。文章还分析了这些变化的原因, 阐述了不同类型区面积与水文气象因子和水环境因子的对应关系, 最后探讨了乌梁素海水环境可持续发展 and 永续利用的技术途径。

关键词: 乌梁素海; 湿地; 环境; 遥感; 演变

1 引言

随着经济的发展和人民生活水平的不断提高, 人们对水资源质量和数量的需求日益增长, 与此同时水体污染现象也日趋严重。据调查, 我国大多数江河、湖泊、水库正面临着水污染和富营养化的威胁, 针对这一现状, 湖泊与水环境专家已着手在洞庭湖、鄱阳湖、青海湖等地进行湖泊水位、水量及容积等湖泊水力特性与其污染状况间的关系研究^[1-4], 旨在控制湖泊水环境的进一步恶化, 并寻求最佳的治理途径。然而, 湖泊污染和富营养化是一个动态演变的过程, 在这一过程中, 它既受湖泊水力特征及自身环境承载能力的影响, 也受经济发展规模的控制, 因而只有系统地研究出湖泊不同类型区面积的演变及其与水文气象因子、水环境因子间的对应关系, 才能进一步找出湖泊污染和富营养化的主导因子, 以便更合理地寻求解决湖泊富营养化的理论依据和技术措施, 从而制定相应的工程和非工程措施。位于中温带干旱和半干旱区的内蒙古自治区, 由于典型的气候特征和地形条件, 造成这一地区的湖泊多分布在低缓起伏的沙地和低矮丘陵区, 如居延海、乌梁素海、哈素海、岱海、黄旗海、查干湖、安固里湖、达里诺湖、科尔沁沼泽地区、呼伦湖自然保护区等, 它们接受农田退水、农区地表、地下径流以及生活、工业污水的大量排放, 造成有机废物和营养物不断富集, 导致各湖泊都不同程度地受到水污染及富营养化的危害, 有些湖泊甚至已丧失其基本功能^[5]。本文以乌梁素海作为研究区, 利用遥感原理对该湖近 17 年来不同类型区面积进行了解译, 旨在研究中温带干旱和半干旱区草型湖泊各类型区面积的动态演变特征及其与主相关因子的对应关系, 为湖泊水污染控制和富营养化治理提供技术支持, 保护水体的生物多样性, 实现湖泊生物资源、旅游资源、水资源的合理开发和永续利用。

收稿日期: 2004-04-28; 修订日期: 2004-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50269001; 50169002); 内蒙古自然科学基金项目 (200208020512); 内蒙古“十五”科技攻关 (20010103) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.50269001; No.50169002; Natural Science Foundation of Inner Mongolia, No.200208020512; The Key Scientific and Technologic Project of the 10th Five-Year Plan of Inner Mongolia, No.20010103]

作者简介: 于瑞宏 (1978-), 女, 内蒙古人, 博士生, 主要从事干旱区水环境分析与水污染控制研究。

E-mail: rhyul@hotmail.com

2 研究区概况

乌梁素海位于内蒙古自治区临海市乌拉特前旗境内,是黄河内蒙段最大的湖泊(图1)。介于北纬 $40^{\circ}36' \sim 41^{\circ}03'$,东经 $108^{\circ}43' \sim 108^{\circ}57'$ 之间,南北长约40 km,东西宽约8 km。湖泊水位控制高程1 018.5 m,水深约0.5~3 m,其中水深在0.8~1.0 m的水域占80%,蓄水量约2.5~3亿 m^3 [6]。该地区属典型的温带大陆性季风气候区,多年平均降雨量为215 mm,降雨主要集中在7~9月,其降雨量占全年总降雨量的73%;多年平均 $\phi 20$ cm蒸发皿蒸发量为2 200 mm,其中5~7月蒸发量约占全年总蒸发量的50%;多年平均气温为6.6 $^{\circ}C$,7月份气温最高,多年平均值为24.6 $^{\circ}C$,1月份气温最低,多年平均值为-10.2 $^{\circ}C$;每年11月至翌年2月,月平均气温低于0 $^{\circ}C$,导致水体表层冻结,冻结厚度约80 cm。乌梁素海现有水域面积333.48 km^2 (据2002年卫片统计),是我国10大淡水湖之一,也是亚洲湿地公约组织名录中的大型湿地生物多样性保护区。湖泊补给水源主要是河套灌区的农田退水(图1),其次是工业废水和生活污水。乌梁素海西岸自北至南有总排干、通济渠、八排干、长济渠、九排干、塔布渠和十排干等主要灌溉渠道和排水沟与湖体相连,1984~2002年灌排渠系多年平均入湖水量为5.61亿 m^3 ;湖水主要消耗于水面蒸发和水生植物蒸腾,多年平均蒸发蒸腾总量为3.6亿 m^3 ,其次是退水,1984~2002年多年平均退水总量(出湖水量)为1.94亿 m^3 ,湖泊南端的泄水闸将湖水泄入总退水渠,之后排入黄河。1978年河套灌区化肥施用量仅7万t,到2002年已迅速上升到52万t,而化肥利用率仅30%,于是流失的化肥随农田退水进入乌梁素海,使乌梁素海的各种营养盐总和达到56万~110万t,加速了乌梁素海的富营养化和沼泽化进程。目前,乌梁素海已成为十分典型的重度富营养化草型湖泊。经测定,乌梁素海大型水生植物总生产力高达360万t/a,全湖芦苇蔓延,1975年芦苇产量仅2.3万t,到1996年上升到6.6万t,至2002年已高达12万t。因芦苇及水草等植物残骸腐烂沉积,50年代以来湖底累计沉积厚度已达360 mm,目前腐烂水草正以每年9~13 mm的速度在湖底堆积[7],致使乌梁素海已成为世界上沼泽化速度最快的湖泊之一。

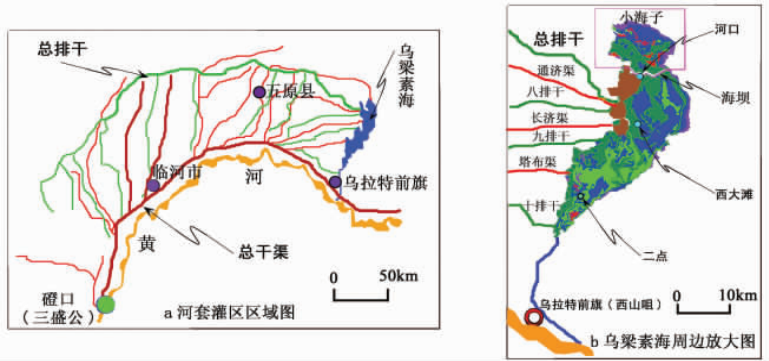


图1 乌梁素海地理位置

Fig. 1 Geographical location of Wuliangsohai

3 典型年卫片信息的选取及分析

按照水体特性,乌梁素海可划分为明水区、芦苇区、密集水草区、沼泽区、浅水区和人工芦苇区6部分,为了明确再现不同类型区面积的变化特征,本文以芦苇、水草生长旺盛的8月(8月卫片质量不好时,选用9月)作为选取时间,即选取1986~2002年间8月(或9月)的Landsat TM、ETM影像数据进行分析,并对乌梁素海17年间不同类型区面积的变化进行比较,进而找出其发生变化的原因。

根据2002年实地踏勘资料,并参照1986年以来乌梁素海的历史记录及历年同期卫星影像信息可初步判断:1987年较1986年湖泊总面积减少,尤其是北部小海子面积明显减少;1988年开始在乌梁素海河口以西种植人工芦苇,因此除原有各类型区面积外又增加了人工芦苇区面积,但由于1988~1990年间8、9月卫星图片都有云雾遮挡,所以只能

选取 1991 年进行研究; 1991~1995 年间乌梁素海总面积变化不大, 而 1996 年海坝以北小海子西侧, 开始从海坝以南引水, 致使该区芦苇得以自然生长, 从卫片上看几乎与南部连成一片, 总面积看似增加; 1996~2000 年连续 4 年总面积减少, 而 2000~2002 年总面积又显著增加, 即 2000 年为转折年。据此, 我们遴选出 1986 年、1987 年、1991 年、1996 年、2000 年和 2002 年作为典型年份进行重点研究(图 2)。从图中可看出: 1986 年乌梁素海湖面宽阔, 明水区面积(颜色黑而连续)大, 湖底水草(黑颜色周边呈淡黑色夹杂绿色区域)生长很少, 北部小海子面积较大, 芦苇(亮绿色)生长茂盛; 1987 年北部面积明显减少, 从而导致总面积减少, 与 1986 年相比明水区面积略有增加; 1991 年清晰可见河口附近已有小面积人工芦苇区, 海坝以南密集水草区面积较 1986 年和 1987 年都大; 1996 年明水区面积进一步减小, 不但海坝以南的明水区水草密集, 而且以北也出现水草充斥明水水体的情形, 人工芦苇种植面积进一步增加, 且北部小海子浅水区域(周边暗红色区域)扩大; 2000 年明水区面积较 1996 年有显著增加, 相反湖底水草长势明显减弱, 人工芦苇种植面积继续增加, 浅水区面积稍有减少; 直至 2002 年, 海坝以南的明水区面积较 2000 年缩小, 湖底水草淤积严重, 密集水草区和浅水面积都呈现出显著增加的趋势。

4 典型年不同类型区面积的提取与分析

应用 ENVI 软件对乌梁素海水域面积进行遥感解译分析, 即对 6 个典型年份卫片 TM2、TM3、TM4 波段的合成图像进行数据提取(图 3)。由于各年的 TM、ETM 影像均选自 8 月(或 9 月), 根据该季节野外实地踏勘和卫片信息的对比可知: 湖中芦苇区在合成图像上呈现亮绿色, 密集水草区呈现淡黑色夹杂绿色, 明水区呈现深黑色, 浅水区呈现暗红色, 沼泽区呈现粉白色, 所以易于提取各类型区面积。

4.1 不同类型区面积的变化特征

由于海坝以北为从海坝以南引水而维持其生态环境功能的地区, 因而其面积受海坝以南水量多寡及人为因素的影响严重, 于是本文根据图 3 的提取结果分海坝以南、海坝以北以及乌梁素海全域统计了不同类型区面积的历年变化(图 4); 同时绘制了以上 3 个区域不同类型区面积占各区域总面积的百分比的历年变化(图 5)。可以看出:

(1) 全湖沼泽区面积总趋势微弱增加。海坝以南, 沼泽区面积在相邻典型年内随水位的降低而增加, 如 1996 年水位高于 2000 年, 但沼泽区面积则是 2000 年大于 1996 年; 而海坝以北这种规律不太明显。此外, 由于沼泽区主要分布于海坝以北, 导致全湖沼泽区面积在相邻典型年(如 1996 年与 2000 年)间也不符合上述规律。

(2) 全湖浅水区面积总趋势微弱减少, 原因在于芦苇区平均每年向外扩展约 4~6 m^[8], 导致部分浅水区逐渐被芦苇挤占。如 1996 年北部小海子周边因水位升高而增加的浅水区域, 到 2000 年已有部分区域变成芦苇地。

(3) 全湖自然芦苇区面积占绝对优势, 且基本呈逐年增加的趋势。海坝以南区域, 1986 年自然芦苇区面积仅为 116.85 km², 到 2002 年已增加到 134.20 km², 年均增长 1.02 km²; 而海坝以北区域自然芦苇区面积总趋势减少。

(4) 自 1988 年人们开始种植芦苇以来, 人工芦苇区面积一直呈增加趋势, 到 1991 年人工芦苇区面积已发展到 14.46 km², 尽管 1991~2000 年间增加趋缓, 但至 2002 年该区面积又快速增加到 28.12 km²。

(5) 就海坝以南而言, 密集水草区面积在相邻典型年内与水位变化是同步的, 而明水区面积与水位变化规律恰好相反。1987 年明水区面积最大, 相对 1986 年增加了 42.38 km², 此时密集水草区面积最小; 1987 年至 1996 年明水区面积明显减少, 由 120.89 km² 减少到 59.64 km², 共减少了 61.25 km², 且在 1987 年至 1991 年间速率较大, 相反密集水

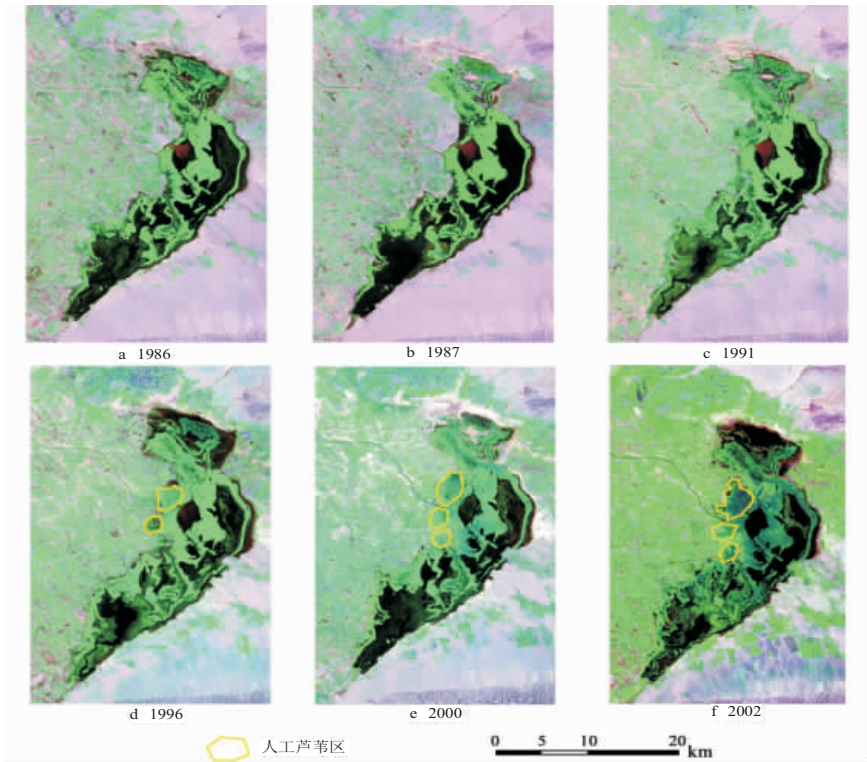


图 2 乌梁素海 6 个典型年卫星 TM2、TM3、TM4 波段的合成图像
 Fig. 2 Composed image of Landsat TM2, TM3 and TM4 of the 6 typical years in Wuliangsuhai

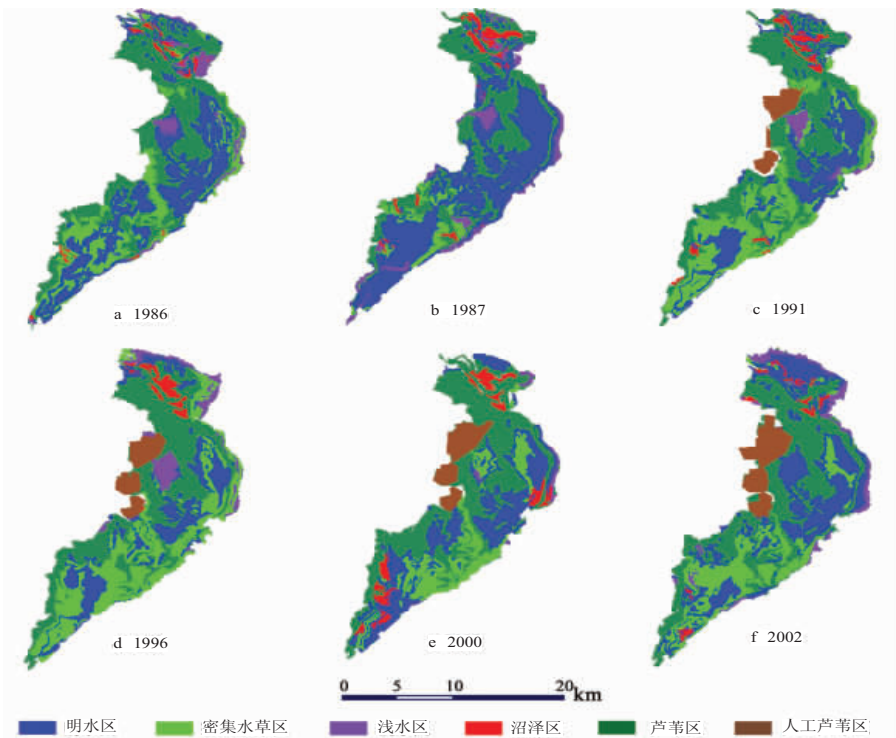
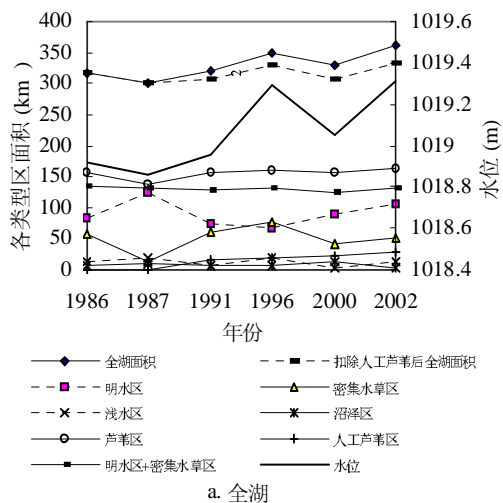
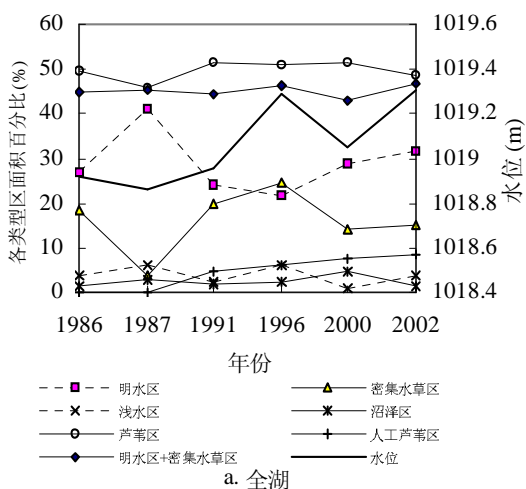


图 3 乌梁素海 6 个典型年不同类型区的提取结果

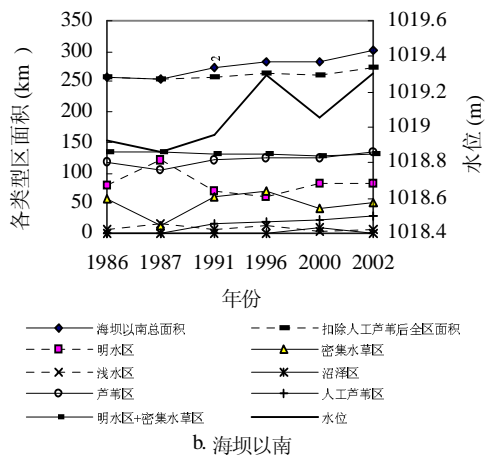
Fig. 3 Extracted result of different types of areas from satellite image of the 6 typical years in Wuliangsuhai



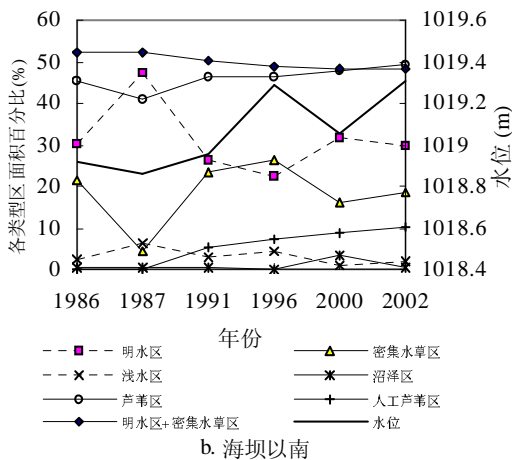
a. 全湖



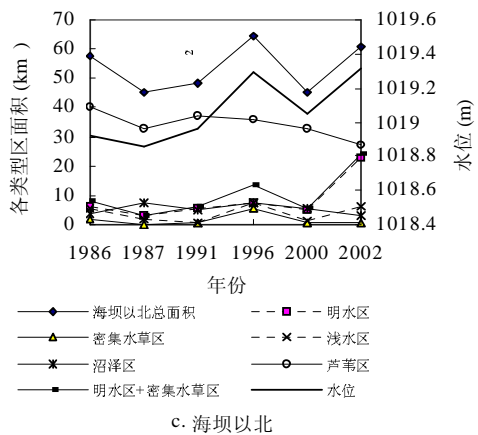
a. 全湖



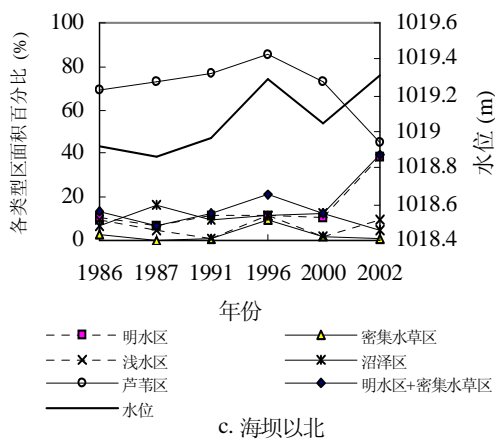
b. 海坝以南



b. 海坝以南



c. 海坝以北



c. 海坝以北

图4 乌梁素海不同类型区面积的历年变化
Fig. 4 Yearly change of different types of areas in Wuliangsuhai

图5 乌梁素海不同类型区面积百分比的历年变化
Fig. 5 Yearly change of percentage of different types of areas in Wuliangsuhai

草区面积迅速增加; 2002 年较 1996 年, 明水区面积有所回升 (图 4b)。此外, 1986~2002 年间, 虽然水位总体趋势增加, 密集水草区面积的百分比趋势增加, 明水区面积的百分比趋势减少, 但是二者之和的百分比总趋势始终减少 (图 5b)。这说明了: ① 水生生物残骸不断在湖中堆积, 使湖底不断抬高; ② 湖中大量富营养盐的排入和沉积, 使芦苇和水草旺盛生长, 加速了湖泊的生物填平作用。然而海坝以北, 明水区面积与水位变化同步, 密集水草区面积随水位变化规律不明显。至于乌梁素海全域, 明水区面积和密集水草区面积的变化特征大体上与海坝以南区域相似。乌梁素海富营养化程度的不断增高, 必将导致湿地环境逐步破坏, 水体功能日趋丧失。

4.2 不同类型区面积与水文气象因子的对应关系

为了系统地分析不同类型区面积与水文气象因子间的对应关系, 利用 6 个典型年的入湖水量、出湖水量、净入湖水量、水面蒸发量、降水量、净湖面蒸发水量、卫片获取日期前汛期降水量的变化曲线 (图 6) 并结合图 4b、5b 清晰可见: 净入湖水量和净湖面蒸发水量变化趋势基本一致, 二者大体持平。卫片获取日期前的汛期降水量与湖泊水位的变化一致, 这说明了汛期因降雨形成的地表洪水及地下径流流入量 (因无观测数据, 以卫片获取日期前的汛期降水量表示) 是造成夏季湖泊水位波动及各类型区相互转化的重要原因。明水区面积基本上随净入湖水量、净湖面蒸发水量的增加和汛期降水量的减少而增加, 而密集水草区面积基本上随净入湖水量、净湖面蒸发水量的增加和汛期降水量的减少而减小。6 个典型年内, 明水区面积和密集水草区面积随入湖水量、出湖水量、降水量、水面蒸发量、水位、水深等因素的影响而相互转换, 二者之和占总面积的百分比却始终呈现减少的趋势 (图 5b)。

由于湖底不断淤积, 即使相同水位条件下, 水深也在逐年减小, 因而明水区面积减少, 密集水草区面积增加, 而且随着时间的推移, 明水区面积还将继续缩小。

4.3 各类型区面积与水环境关系

由于受海坝的阻隔, 并考虑到各排干的入湖位置均位于海坝以南, 对于海坝以北水域基本没有影响, 因此对于海坝以南区域水环境指标的测定更具代表性, 更能体现整个湖泊的富营养化程度。基于上述原因, 为了便于揭示乌梁素海不同类型区面积与水环境因子间的对应关系, 这里只研究海坝以南水域。从海坝以南主要水环境指标 (耗氧量、溶解氧、透明度、矿化度、总 P 及总 N) 的历年变化 (图 7), 结合图 4b 整理出 1986~1996~2002 年间不同类型区面积与水环境因子的变化关系 (表 1)。可看出: 无论 1986~2002 年间, 还是 1996~2002 年间, 水环境因子中的耗

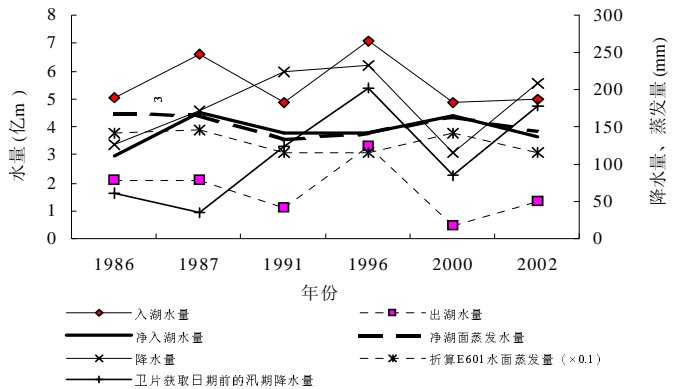


图 6 乌梁素海各水文气象因子的历年变化
Fig. 6 Yearly change of hydrometeorologic factors in Wuliangsuhai

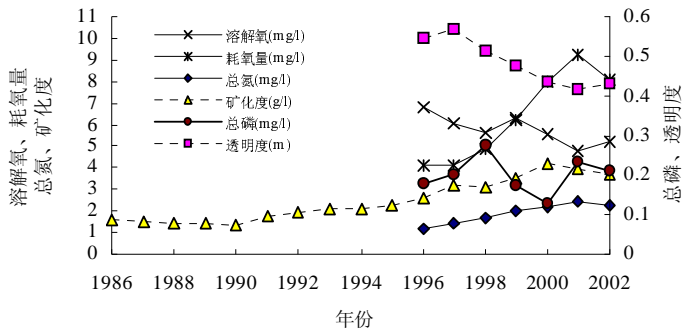


图 7 乌梁素海主要水环境指标的历年变化
Fig. 7 Yearly change of key water environment parameters in Wuliangsuhai

表 1 乌梁素海不同类型区面积变化与水环境因子的对应关系

Tab. 1 Relationship between change of different types of areas and water environment parameters in Wuliangsuhai

项目	不同类型区面积 (km ²)						
	明水区	密集水草区	浅水区	沼泽区	芦苇区	人工芦苇	海坝以南面积
1986年	78.505	55.817	6.014	0.935	116.847	0	258.118
1996年	59.641	70.186	11.912	0.339	123.178	19.264	284.520
2002年	81.695	50.081	5.865	1.237	134.197	28.115	301.190
1986-2002年间的变化量	3.190	-5.736	-0.149	0.302	17.350	28.115	43.072
1996-2002年间的变化量	22.054	-20.105	-6.047	0.898	11.019	8.851	16.670

项目	水环境因子					
	矿化度 (g/l)	耗氧量 (mg/l)	总磷 (mg/l)	总氮 (mg/l)	溶解氧 (mg/l)	透明度 (m)
1986年	1.521					
1996年	2.601	4.128	0.181	1.197	6.790	0.543
2002年	3.700	8.090	0.212	2.257	5.167	0.430
1986-2002年间的变化量	2.139					
1996-2002年间的变化量	1.099	3.962	0.032	1.060	-1.623	-0.113

氧量、总磷、总氮、矿化度均趋势增加，溶解氧、透明度均趋势减少，这说明乌梁素海水环境不断恶化，富营养化逐渐加剧；在不同类型区面积中，伴随着湖泊总面积的增加，芦苇区、人工芦苇区、沼泽区、明水区面积增加，密集水草区、浅水区面积减少。然而，一方面由于明水区与密集水草区都属于沉水植物生长区，二者随水位的升降而相互转化，明水区与密集水草区面积之和占总面积的百分比却由 1986 年的 52.0% 减少到 2002 年的 48.3% (图 5b)，这说明在水位不变的情况下，伴随着富营养化的加剧，明水区不断向密集水草区转化，密集水草区和浅水区不断向芦苇区转化，部分浅水区或芦苇区向沼泽区转化。另一方面，随着芦苇区、沼泽区及沉水植物生物量的增加，湖中各种营养盐被植物吸收转化，一定程度上加大了水体的自净能力，但同时植物茎叶和根系腐烂又加速了湖底的生物填平作用，释放出的营养盐将对湖泊造成二次污染。

此外，在不考虑春季 (3~5 月) 水位迅速上升致使芦苇死亡的情况下，每年芦苇区正以 4~6 m 的速度不断向外扩展，如果不加以控制，发展下去必然导致湖体内各局域芦苇区连成一体，那么乌梁素海将逐渐丧失湖泊功能及灌区排水功能，并且按照生物填平速度 10 mm/a 计算，在约 30 年左右里，乌梁素海将变成芦苇沼泽地或盐碱滩。

5 结论

(1) 从 1986 年到 2002 年，乌梁素海总水域面积尽管受多种因素的影响而波动变化，但总体上呈增加趋势，面积减少的两个期间分别是 1986~1987 年及 1996~2000 年。

(2) 乌梁素海总水域中，自然芦苇区占绝对优势，该区面积约占全湖总面积的 45.8~51.5%，且呈逐年上升的趋势；其次为明水区和密集水草区，二者面积之和约占总面积的 42.9~46.7%。海坝以南水域，因受湖泊水位、入湖水量、出湖水量、降水量、水面蒸发量的影响，明水区面积和密集水草区面积相互转化，但二者之和占总面积的百分比始终呈逐年减少的趋势。

(3) 伴随着湖泊总面积的增加，芦苇区、人工芦苇区、沼泽区、明水区面积趋势增加，密集水草区、浅水区面积趋势减少。因湖中富营养盐的不断富集，导致相同水位下明水区不断向密集水草区转化，密集水草区和浅水区不断向芦苇区转化，部分浅水区或芦苇区向沼泽区转化。湖中生物量的加大尽管增加了水体的自净能力，但同时也加速了湖体的生物填平作用，并造成湖泊的二次污染。

(4) 1986~2002 年间，乌梁素海水环境日趋恶化，富营养化日趋严重，农闲时期适当

向湖中灌水, 并合理控制水位, 对降低湖中耗氧量、总磷、总氮、矿化度, 或提升湖中溶解氧、透明度等水环境指标有明显作用。

参考文献 (References)

- [1] Jin Shenggao, Jiang Shirong. The elementary analysis of hydrologic character on the excess of Dongtinghu Lake. *Express of Water Resources & Hydropower Information*, 2001, 22(18): 23-26. [金升高, 江世荣. 洞庭湖湖口水文特性浅议. *水利水电快报*, 2001, 22(18): 23-26.]
- [2] Bai Xue, Lu Nanjun. Approach on space-time distributed regularity of water quality parameters of Poyanghu Lake. *Water Science Information of Jiangxi*, 1994, 20(2): 181-188. [白雪, 吕南军. 鄱阳湖水水质参数时空分布规律探讨. *江西水利科技*, 1994, 20(2): 181-188.]
- [3] Liu Xiaoyuan. Analysis on the change trend of water level of Qinghai Lake. *Arid Zone Research*, 2001, 18(3): 58-62. [刘小园. 青海湖水位变化分析. *干旱区研究*, 2001, 18(3): 58-62.]
- [4] Zhu Yan, Cui Guangbo, Yang Jue. Causes of shrinking and drying up of Qinghai Lake, trend of development and its impact on ecological environment. *Journal of Hohai University*, 2001, 29(4): 104-108. [朱琰, 崔广柏, 杨珏. 青海湖萎缩干涸原因, 发展趋势及对生态环境的影响. *河海大学学报*, 2001, 29(4): 104-108.]
- [5] Environment Monitoring Center of Inner Mongolia. Environmental announcement of Inner Mongolia from 1999 to 2002. [内蒙古自治区环境监测中心站. 1999年~2002年内蒙古自治区环境状况公告. 1999-2002年.]
- [6] Wang Lumping, Chen Yaxin, Zeng Guofang et al. *Irrigation & Drainage and Salinization Control of Hetao Irrigated Region in Inner Mongolia*. Beijing: Water and Electric Power Press, 1993. 64-76.
- [7] Shang Shiyu. Study on the management of eutrophication in Wuliangshuai. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2003, 24(4): 6-12. [尚士友. 乌梁素海富营养化及其防治研究. *内蒙古农业大学学报*, 2003, 24(4): 6-12.]

Change of Wetland Environment in Wuliangshuai

YU Ruihong¹, LI Changyou², LIU Tingxi², XU Youpeng¹

(1. *Department of Urban and Resources, Nanjing University, Nanjing 210093, China*

2. *College of Hydraulic And Civil Architecture Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China*)

Abstract: In this paper remote sensing principle is used to explain the changing trend of different types of areas in Wuliangshuai since 1986. It points out the general trend of total water area is increasing, that is, clear water area increased before 1987, decreased from 1987 to 1996 and increased again from 1996 to 2002. However, the case of giant water-grass area is basically opposite to that of clear water area; namely, natural reed area decreased before 1987, but increased after 1987; shallow water area and swamp area only increased slightly; and artificial reeds began to be planted in 1988, presenting an increasing trend in area year by year. Then we analyze the causes for all the changes, and expound the relationship between the changes of different types of areas and the parameters of hydrometeorological and water environmental factors. Finally, we discuss the technical means for sustainable development and perdurable utilization of water environment in Wuliangshuai.

Key words: Wuliangshuai; wetland environment; remote sensing; different types of areas; change