

文章编号:1001-1986(2008)01-0044-05

淮南矿区塌陷塘水体水质的变化

计承富¹, 桂和荣^{1,2}, 王和平², 方文惠¹, 王正红¹

(1. 安徽理工大学资源与环境工程系, 安徽 淮南 232001;

2. 宿州学院, 安徽 宿州 234000)

摘要:结合物理、化学、生物学指标,采用 Margelef 多样性指数、营养状态综合指数法对淮南矿区塌陷塘水体水质进行定性分析和定量研究,发现水体受有机污染严重, BOD₅、COD_{Cr}、TP 等指标含量较高,水质状况已趋于富营养化,其水体中氮的含量与水质变化的相关性明显大于磷,而且磷受环境因素影响较明显; Margelef 多样性指数也由 1986 年的 3.20 减至 2005 年的 2.21 (小于 2.5), 营养状态综合指数为 65.18, 水质级别为中度富营养()。这说明塌陷塘水体水质变化一方面受环境因素干扰较为严重,另一方面也有其内在的发展规律,和内陆湖泊相比有较明显的特殊性。

关键词:塌陷塘; 水质; Margelef 多样性指数; 营养状态综合指数

中图分类号: X143 **文献标识码:** A

Investigation of water quality variation of subsidence pool in Huainan mining area

Ji Cheng-fu¹, Gui He-rong^{1,2}, Wang He-ping², Fang Wen-hui¹, Wang Zheng-hong¹

(1. Dept. of Resource and Environmental Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Suzhou College, Suzhou 234000, China)

Abstract: Combined the physical, chemical and biological index, using the Margelef multiple index and trophic state of comprehensive index (TSCI), the qualitative analysis and investigation of the water body quality of the subsidence pool are carried on in Huainan mining area, the inherent laws of water quality variation are discussed. As results the study discovered that this water body is affected seriously by organic pollution, and the content of BOD₅, COD_{Cr}, TP and some other indexes are higher, the water quality condition is tended to the eutrophication, where the relevance between the content of the nitrogen and the water quality change is more obvious than the phosphorus, moreover, the phosphorus is influenced obviously by the environmental factors. The Margelef multiple index also reduced from 3.20 (1986) to 2.21 (2005) (< 2.5), and TSCI is 65.18, the water quality grade is mid-eutrophication (). It is suggested that, on the one hand, the change of the water quality of the subsidence pool in mining area is disturbed seriously by the environmental factors, on the other hand, also has its intrinsic law of development, and compared with the interior lake, it has the obvious particularity.

Key words: subsidence pool; water quality; Margelef multi Index; trophic state of comprehensive index

矿区塌陷塘水域一般为封闭系统,与外界流通较少,有毒物不易排除,受煤炭粉尘和周围环境影响较大。随着煤炭大量开采,塌陷面积大幅增加,并且塌陷塘位于采煤区内,煤矿废水和矿井水排入,煤矿废弃物在水体附近堆积或浅埋,都会污染塌陷塘水体^[1-2],因此对矿区塌陷塘水体水质变化的调查研

究十分重要。目前国内外在矿区塌陷塘水体生态系统及其环境质量状况方面的研究还处于起步阶段,对其水环境质量状况的评价尚无统一的指标和方法^[3-4]。本文基于国内外的研究进展和作者对矿区塌陷塘水体研究的具体情况,结合物理、化学、生物学指标,采用 Margelef 多样性指数、营养状态综合指

收稿日期:2007-03-14

基金项目:安徽省高校省级自然科学研究重点项目(2006KJ009A);安徽省高校“十五”学科拔尖人才基金(教秘人[2003]022)

作者简介:计承富(1969—),男,安徽肥东人,硕士研究生,从事水资源与水处理方面的研究。

- [12] 李建中,彭芳乐. 描述粘土粘塑性的新参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 859 - 858.
- [13] TATSULKA F, ISHIGARA M, DI B, et al. Time-dependent compression deformation characteristics of geomaterials and their simulation [J]. Soil and foundation, 2002, 42(2): 103 - 138.
- [14] LI J Z, ACOSTA M, TATSUOKA F, et al. Viscous property of soft clay

- and its modeling[C]. Proceedings of the International Symposium on Engineering Practice and Performance of Soft Deposits (IS - Osaka2004). Osaka: Yodogawa Kogisha. 2004: 1 - 6.
- [15] LI J Z, PENG F L, XU L S, et al. Viscous Properties of Clay with Deferent Water Content[C]. Soil and Rock Behavior and Modeling, Geotechnical Special Publication No. 150. 2006: 55 - 61.

数法对淮南矿区塌陷塘水体水质进行定性分析和定量研究,找出其内在发展规律,为矿区塌陷塘水体水质变化的监测和管理提供科学依据。

1 矿区塌陷塘基本概况

淮南煤矿区主要是井下开采,对生态环境的影响主要表现为:土地沉陷,矸石山压占土地,景观破坏,矸石淋溶水污染周围水环境,矿井地下水疏排破坏矿区地下水资源环境,并对地面建、构筑物造成损坏等。此外塌陷积水区水源为浅层地下水和大气降水补给^[2],当地土质不可避免地影响其水化学成分,并且水体底泥主要为塌陷的地表土壤,塌陷塘水化学成分的形成亦受控于土壤矿物化学成分。矿区原生地球化学特征取决于下述条件^[5-6]:谢家集区石灰岩丘陵坡麓的岩土类型为石灰土,岩石矿物成分主要为石灰岩、白云岩、大理岩,含钙质、铁质结核,主要化学元素有 Ca、C、Mg、Fe、Re、Ti 等。其次生地球化学特征^[5-6]表现最为突出的是污水灌溉和固体废弃物。由于塌陷塘为农田所包围,农药、化肥和污水灌溉严重影响塘中水质,加之塌陷塘处于煤矿周围,矸石山大量堆积,经日晒、风化、淋溶后,许多污染物带入水体,造成土质和水质改变。

针对淮南矿区采煤塌陷塘不同的塌陷时间序列,对各塌陷塘的水域面积、水深、水力条件及其周边环境影响因素进行了长期的调研,经综合分析,选择具有代表性的谢二矿南采煤塌陷塘(简称:谢二塘)作为研究对象,分析其水体水质变化情况。

谢二塘位于淮河以南谢家集区境内,矿井始建于 1954 年,1956 年建成投产,1957 年即出现塌陷,井田面积 5.7 km²,矿井于 2002 年破产。塌陷塘面积较大,约为 128 000 m²,水体最大深度为 22.1 m,现做养鱼利用,附近为农田,北临公路。

2 研究方法

2.1 采样点的布设

采样点布设在塌陷塘端面垂线上,在入水口、出水口和水中心设置具有代表性的 3 个取样点,采集距离水面以下不同深度的水样。在每条垂线上分别设 3 个取样点,即水面下 0.5 m、1/2 水深处和水底上 0.5 m 处,并且把 3 个样点的水等量混合后作为一个样品进行理化指标的监测和浮游生物的定量测试。

2.2 监测项目及方法

为了确定塌陷塘水体水质变化状况,对所测得的数据进行相关分析,选择了对该水体水质变化较

密切的几项指标:营养盐状况指标——总磷(TP)、总氮(TN);理化环境状况指标——溶解氧(DO)、生化需氧量(BOD₅)、化学耗氧量(COD_{Cr})、透明度(SD);生物指标——叶绿素 a(chla)、浮游生物等进行分析研究。

2005 年 4 月—2006 年 1 月间,每月采样 1 次。在每月的中下旬,晴好日子,连续 3 天,上午 8:00—11:00 采样,各点位采样次序一致。

浮游生物标本采集,用中国科学院武汉水生物研究所提供的 25 号浮游生物网,在水面表层至 0.5 m 深处以 20~30 cm/s 的速度作 形循环缓慢拖动约 1~3 min,或在水中沿表层拖滤 1.5~5 m³ 水体积。水样采集之后,马上在每 L 水样中加入 15 mL 左右鲁哥氏液,固定后立即送实验室测定。SD 用塞氏盘法现场测定;其余项目采集后均立即在本校环境微生物和水化学实验室监测,具体测定方法如表 1 所示。

表 1 塌陷塘水质指标测定方法^{*}

Table 1 The analytical methods of water quality indexes			
序号	分析项目	分析方法	测定下限 /mg L ⁻¹
1	总氮	碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度法	0.05
2	总磷	钼酸铵分光光度法	0.01
3	叶绿素 a	分光光度法	
4	溶解氧	碘量法	0.2
5	生化需氧量	稀释接种法	2
6	化学耗氧量	重铬酸钾法	10

^{*}《水和废水监测分析方法(第 4 版)》,中国环境科学出版社,2002 年。

3 结果与讨论

3.1 理化指标

水体中 SD 大小是决定水体生产力高低的重要因子之一,也是测定最方便的富营养化指标之一。塘内水体的透明度一般在 20~30 cm 之间为肥水,小于 20 cm 或大于 40 cm,表明水质过肥或过瘦^[7]。谢二塘水体透明度(图 1)年均值为 0.76 m,其月平均最高值和最低值相差不明显,最低值 0.60 m 出现于 10 月份,最高值 1.08 m 出现在 1 月,其变幅介于 0.6~1.08 m 之间,说明水质相对较瘦,这与塘内有草鱼放养相一致。总的来说其透明度随季节变化趋于平稳,变幅不大,这可能与塘的利用现状有关;就空间采样点的变化而言,中心区采样点透明度值偏高,岸边采样点则相对较低。

水中 DO 主要与水温、大气压两个因素相关,它不仅是鱼类为主的水生物生存、生长的首要条件,而且对水环境物质循环、改善鱼类生活环境等方面起着重要的作用。由图 2 可见,谢二塘 DO 含量最低

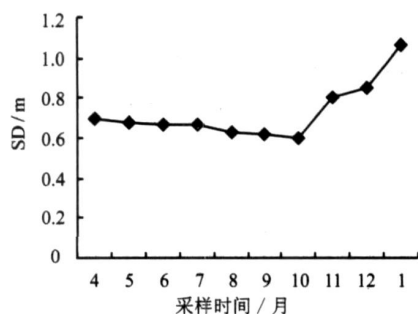
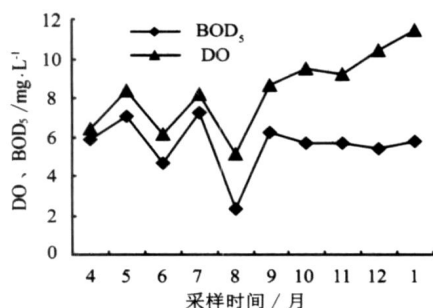


图 1 谢二塘透明度 SD 随时间变化图

Fig. 1 Monthly variation of SD in Xie'er pool

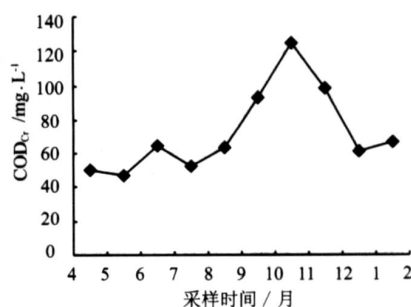
值为 8 月份的 5.08 mg/L, 最高值为 2006 年 1 月的 11.43 mg/L, 全年平均含量为 8.49 mg/L, 变化范围居于 5.08 ~ 11.43 mg/L 之间。自 9 月份起 DO 含量开始逐渐升高, 说明这段时间塘内浮游植物光合作用总产量一直大于总耗氧量。4、6、8 月溶解氧含量较低, 这与监测结果——藻类总量在这 3 个月也相对较少相一致。从各月监测结果的平均值来看, DO 年均值含量达到了 GB3838 - 2002《地表水环境质量标准》规定的Ⅲ类标准, 除 4、6、8 月 DO 含量较低, 其余月份塘内水体溶解氧都趋于饱和, 处于良好的氧化环境, 有利于有机物质的转化和再生^[7-8]。

图 2 谢二塘 BOD₅、DO 随时间变化图Fig. 2 Monthly variation of DO, BOD₅ in Xie'er pool

谢二塘水体 BOD₅ 含量(图 2)随时间变化较明显, 尤其是夏季。7 月份含量最高为 7.24 mg/L, 随后的 8 月份出现最低值为 2.34 mg/L, 按地表水环境质量标准 GB3838 - 2002 为Ⅲ类(3 mg/L), 年均值为 5.59 mg/L。冬季该值变化相对稳定; 从年均值来看, 属于Ⅲ类(6 mg/L)。全年监测结果值均未超过Ⅲ类(10 mg/L)标准。

化学耗氧量(COD_{Cr})通常是作为评定水质是否受到有机污染的重要指标。湖泊的 COD_{Cr} 与 BOD₅ 一样, 除了用来评价普通有机物外, 还用来评价藻类的现存量^[8-9]。从各月监测结果的平均值来看, 谢二塘水体 COD_{Cr} 含量(图 3)变化范围为 47.18 ~ 124.54 mg/L。除 5 月份相对较低(47.18 mg/L)外,

其余月份均超出 GB3838 - 2002《地表水环境质量标准》规定的Ⅲ类标准。但就全年来说 COD_{Cr} 总的变化趋势是自 4 月开始逐渐升高, 直至 10 月出现最高值(124.54 mg/L), 之后又开始下降。谢二塘 10 月份的有机污染严重, 这一峰值有可能是附近污水注入结果, 也有可能是藻类数量减少降解力降低所致, 具体尚不清楚, 有待进一步调查。从以上分析可以看出, 该水体受有机污染严重, 应成为该种水域水质监测和保护过程中不可缺少的一项指标。

图 3 谢二塘 COD_{Cr} 随时间变化图Fig. 3 Monthly variation of COD_{Cr} in Xie'er pool

3.2 营养盐指标

从图 4 可以看出谢二塘水体 TP 含量在 0.33 ~ 1.46 mg/L 之间, 最高值出现在 4 月份(1.46 mg/L)和 12 月份(1.39 mg/L), 这可能与 4 月份有大量农田肥水渗入, 12 月份恰逢藻类的生长淡季, 此时磷等营养盐可以有一个积累过程等因素有关。9、10、11 月 TP 含量则相对较低, 介于 0.3 ~ 0.4 mg/L 之间, 这 3 个月由于有藻类适宜的生长条件, 且外界污水的注入减少, 磷含量相对降低。

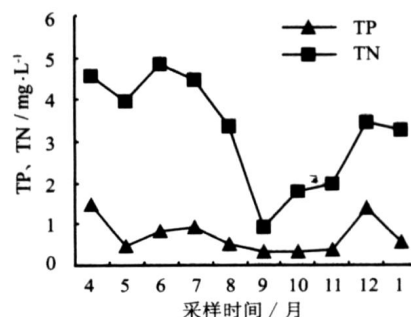


图 4 谢二塘 TN、TP 随时间变化图

Fig. 4 Monthly variation of TN, TP in Xie'er pool

谢二塘水体 TN 含量(图 4)峰值 4.83 mg/L 出现在 6 月份, 夏季(4—8 月)一般较高, 最低值出现在 9 月份为 0.92 mg/L。和 TP 随时间变化相同的是: TN 含量在 9—11 月相对于全年来说也较低, 12 月份则开始升高, 这种变化可能同水体浮游植物对营养盐的吸收情况有关, 同时与大气降水和农业耕作(浇灌肥水渗入等)之间也有关联。

一般认为总磷与无机氮浓度分别达到 0.02 mg/L 与 0.3 mg/L 的水体,标志着已处于富营养化状态。也有人认为,水体营养物质的负荷量达到的临界负荷量:总磷为 0.2~0.5 mg/L,总氮为 5~10 mg/L,即标志水体已处于富营养化状态。由上述可知,谢二塘 TP、TN 等营养性污染浓度严重超标,表明农业面源污染和畜禽业污染对塌陷塘影响较明显;从监测结果来看,谢二塘 TP 含量年均值为 0.717 mg/L, TN 含量年均值为 3.29 mg/L,可见 TP 含量超标更为严重。

结合以上分析,可知其水体中氮的含量与水质变化的相关性明显大于磷,水体基本上应该是氮控制的,因此对谢二塘水体富营养化趋势的控制可以从营养盐氮的限制着手进行。

3.3 微生物学评价

由于绝大多数水生生物终生生活在水中,与水域环境质量关系密切。水质的任何变化都可能影响水生生物的生理功能、种类丰度、种群密度、群落结构与功能的改变,因此,水生生物的生物学、生态学、生理学特征是反映水体质量好坏的重要指标^[10-11]。这里选取了能从不同侧面反应水质状况的微生物学指标^[10-12]——藻类,用 Margelef 多样性指数来初步探讨谢二塘目前水体水质状况。藻类是水生生态系统中的初级生产者,是整个系统中物质循环和能量流动的基础,它的组成及数量的调节对维护生态平衡具有重要作用。从谢二塘 2005 年浮游植物藻类监测结果与 1986 年的调查结果相比较(图 5),不难看出除硅藻外,其余藻类(蓝藻、绿藻、裸藻、甲藻和隐藻)数量随塌陷时间的延长而呈上升趋势,变化最明显的为裸藻和甲藻,裸藻在 1986 年为 0.8 ind/mL 到 2005 年检出量为 42 ind/mL,增长近 52.5 倍;甲藻则从 1986 年的几乎未检出到 2005 年检出量为 29.1 ind/mL;其次为绿藻,2005 年所监测的绿藻个体数量为 1986 年监测结果的 5.5 倍;2005 年监测结果中蓝藻和隐藻的检出量较 1986 年也增长了 2~3 倍;而对水质具有指示性作用的硅藻检出量则表现为随塌陷塘时间的增长而下降的趋势,1986 年硅藻类个体检出量为 1 150.6 ind/mL,塌陷塘经过近 20 a 演变,现在硅藻数量减至 579.8 ind/mL,为 1986 年硅藻检出量的近 1/2,这说明谢二塘水体水质有逐年变差的趋势。(1986 年的数据来源于《淮南市生态环境现状调查报告》,2001. 12)

多样性指数就是运用数理统计方法来研究水体污染状况,其理论基础是污染会影响生物的种类与

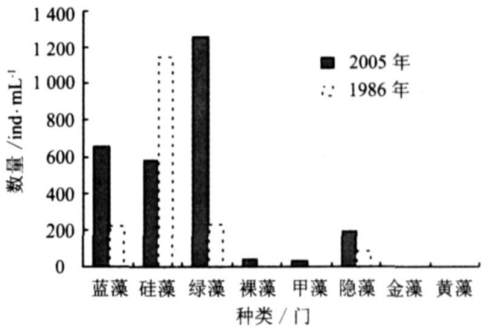


图 5 谢二塘水体浮游藻种类和数量变化情况

Fig. 5 The chang of algae species and algae biomass in Xieer pool

数量的多少。Margelef 多样性指数 $d = \frac{S-1}{\ln N}$ (S 表示藻类种类数, N 表示藻类总个体数),是常用的评价指标之一。在有机污染的水体中,少数耐污种的数量明显增加,而大多数种类受到抑止或者消亡,所以多样性指数值反映污染的轻重,出现一定的规律,通常 d 值以 2.5 为分界,小于 2.5 者,为环境受到严重干扰^[12-15]。表 2 为谢二塘 1986 年和 2005 年浮游藻类种类数变化情况。将相关数值代入上述公式可计算出 1986 年和 2005 年的 Margelef 多样性指数 d 值分别为 3.20 和 2.21。

表 2 谢二塘水体浮游藻种类变化情况
Table 2 The chang of algae species in Xieer pool

监测时间	蓝藻门	硅藻门	绿藻门	裸藻门	甲藻门	隐藻门	金藻门	黄藻门	总计
2005 年	40	20	18	2	5	3	-	-	88
1986 年	22	15	52	4	-	2	-	-	95

以上数据显示谢二塘在 1986—2005 年间,经过近 20 a 的周围环境及人为活动的影响,水体水质有富营养化趋势,耐污藻类数量增多,藻类种属数变少,两次调查说明谢二塘水体水质变化受环境因素干扰较严重。

3.4 营养状态综合指数法

营养状态综合指数(TSCI)法是通过综合多项富营养化指标来实现对湖泊营养状态的连续分级(Carlson, 1977),该方法也得到了较为广泛的应用,并在实践中不断得到完善(李祚泳和张辉军, 1993; 张义科等, 1997; 张海林等, 2002)。这里采用的综合营养状态指数^[15-16],选择 chl_a、BOD₅、TP、TN、COD 和 SD 6 个指标来综合分析各塌陷积水区的水质状况(监测数据有限)。综合营养状态指数公式^[16]为:

$$TSI() = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TSI(j) ,$$

式中 $TSI()$ 表示综合营养状态指数; $TSI(j)$ 代表

第 j 种参数的营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重。以 $chl a$ 作为基准参数, 则第 j 种参数归一化的相关权重计算公式为:

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2},$$

式中 r_{ij} 为第 j 种参数与基准参数 $chl a$ 的相关系数; m 为评价参数的个数。中国湖泊的 $chl a$ 与其他参数之间的相关关系 r_{ij} 及 r_{ij}^2 见表 3。

表 3 中国湖泊部分参数与 $chl a$ 的相关关系 r_{ij} 及 r_{ij}^2 值 *

Table 3 The value of r_{ij} and r_{ij}^2 of the relation between the lake in China and $chl a$

参数	$chl a$	TP	TN	SD	COD	BOD_5
r_{ij}	1	0.84	0.82	- 0.83	0.83	0.80
r_{ij}^2	1	0.705 6	0.672 4	0.688 9	0.688 9	0.6

*表中 r_{ij} 来源于中国 26 个主要湖泊调查数据的计算结果, 引自金相灿等著《中国湖泊环境》, 1990。

营养状态指数计算式^[15]:

$$TSI(BOD_5) = 10 \times (2.118 + 2.579 \ln BOD_5); \quad (1)$$

$$TSI(SD) = 10 \times (5.118 - 2.117 \ln SD); \quad (2)$$

$$TSI(COD) = 10 \times (0.109 + 2.661 \ln COD); \quad (3)$$

$$TSI(TN) = 10 \times (5.453 + 1.849 \ln TN); \quad (4)$$

$$TSI(TP) = 10 \times (9.436 + 1.624 \ln TP); \quad (5)$$

$$TSI(chl a) = 10 \times (2.5 + 1.086 \ln chl a), \quad (6)$$

式中 SD 为湖水透明度值, m ; $chl a$ 为湖水中叶绿素 a 含量, mg/m^3 ; BOD_5 为湖水中生化需氧量, mg/L ; COD 为湖水中化学需氧量, mg/L ; TP 为水中总磷, mg/L ; TN 为水中总氮, mg/L 。各指标含量见表 4。为了说明谢二塘水体富营养状态情况, 这里采用 0~100 的一系列连续数字对其营养状态进行分级^[15-16], 如表 5:

表 4 谢二塘水体各相关指标平均值

Table 4 The average value of the indexes in Xieer Pool

指标	TP /mg L ⁻¹	TN /mg L ⁻¹	BOD ₅ /mg L ⁻¹	COD /mg L ⁻¹	chl a /mg m ⁻³	SD /m
均值	0.44	6.82	5.65	68.4	15.72	0.76

表 5 水体营养状态分级标准

Table 5 Grade of trophic state

等级	贫营养 ()	中营养 ()	富 营 养		
			轻度富营养 ()	中度富营养 ()	重度富营养 ()
$TSI()$	< 30	30 ~ 50	50 ~ 60	60 ~ 70	> 70

在同一营养状态下, 指数值越高, 其营养程度越重, 将相关数值代入上式得计算结果为: 谢二塘水体营养状态综合指数为 65.18, 对照表 5 可知其水质级别为中度富营养()。

4 结论

研究表明, 淮南矿区谢二塘水体水质已经受到一定程度的污染, 按营养状态综合指数其污染级别为 级, 属中污染级别; 从生物学角度来看水体富营养趋势相对较明显, 属中度富营养; 水体受有机污染严重, BOD_5 、 COD_{Cr} 、 TP 等指标含量较高, 水质状况已趋于富营养化, 其水体中氮的含量与水质变化的相关性明显大于磷, 而且磷受环境因素影响较明显; Margelef 多样性指数也由 1986 年的 3.20 减至 2005 年的 2.21 (小于 2.5), 其水体水质变化一方面受环境因素影响较大, 另一方面也有其内在的发展规律, 有较明显的特殊性。

因此, 从塌陷塘的生态状况出发, 探求适合不同功能支持下的水质保护和富营养化防治措施显得颇为重要。

参考文献

- [1] 尹国勋. 煤矿环境地质灾害与防治[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1997: 9 - 11.
- [2] 崔龙鹏. 淮南煤矿塌陷区煤矸石填充复垦及其对环境的影响[J]. 安徽地质, 1998(3): 58 - 61.
- [3] 刘永, 郭怀成. 湖泊生态系统健康评价方法研究[J]. 环境科学学报, 2004(4): 723 - 729.
- [4] 孔红梅, 赵景桂, 姬兰桂, 等. 生态系统健康评价方法初探[J]. 应用生态学报, 2002, 13(4): 486 - 490.
- [5] HARRIS J H, SILVEIRA R. Large - scale assessments of river health using an index of biotic integrity with low - diversity fish communities[J]. Freshwater Biol, 1999, 41: 235 - 252.
- [6] 桂和荣, 胡友彪, 宋晓梅, 等. 矿业城市浅层地下水资源研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002: 83 - 108.
- [7] 张水元, 刘瑞秋. 三湖连江水库水化学特性[J]. 水生生物学学报, 2000, 24(5): 521 - 529.
- [8] KYONG H, HYUN W K, GEAJAEJ. The phytoplankton succession in the lower part of hypertrophic Nakdong River (Mulgum), South Korea[J]. Hydrobiologia, 1998, 369/370: 217 - 227.
- [9] REYNOLDS C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status[J]. Hydrobiologia, 1998, 369/370: 11 - 26.
- [10] 黄玉瑶. 内陆水域污染生态学——原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 143 - 152.
- [11] ODUM E P. The strategy of ecosystem development[J]. Science, 1969(164): 262 - 270.
- [12] Environmental assessment report NO.4 Nutrients in European ecosystems [R]. EEA. 1999: 16 - 19, 39 - 40.
- [13] CLEMENTS F E. Plant succession: analysis of the development of vegetation[J]. Paul. Carnegie Inst. Wash. 1916, 242: 1 - 512.
- [14] REYNOLDS C S. Phytoplankton periodicity: the interactions of form, function and environmental variability[J]. Freshwat. Biol. 1984, 14: 111 - 142.
- [15] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002(5): 47 - 49.
- [16] 金相灿, 刘鸿亮. 中国湖泊富营养化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 68 - 69, 132 - 134.