

安徽万佛湖富营养化评价与营养盐变化趋势预测^{*}

汪万芬¹, 武 艳¹, 刘昌利², 储金宇³

(1. 皖西学院 城市建设与环境系, 安徽 六安 237012; 2. 皖西学院 化学与生命科学系, 安徽 六安 237012;
3. 江苏大学 环境学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 基于安徽万佛湖 2001 - 2007 年监测资料, 采用综合评价法 (TLI) 进行富营养化评价; 并依据灰色系统理论, 构造了 3 个 GM(1, 1) 模型组成的灰色动态模型群, 运用该模型群对万佛湖营养盐变化趋势进行预测。结果表明: (1) 2007 年万佛湖综合营养状态指数为 33.537, 处于中营养水平, 富营养化程度受水期影响较小; (2) 运用灰色动态模型群法对万佛湖营养盐进行预测结果表明, TN 浓度呈显著上升趋势, TP 浓度呈显著下降趋势。灰色动态模型群法以模型群统计平均值作为最终预测值, 避免了单一灰色模型容易利用不稳定信息的缺陷, 能够充分利用近期水质资料信息预测未来水质变化趋势, 预测结果对当地饮用水源保护与淡水资源持续开发利用具有一定的借鉴意义。

关键词: 灰色模型动态群; 营养盐; 富营养化评价; 万佛湖

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)03-0079-05

Eutrophication Evaluation and Nutrients Changes Trend Forecast of Wanfu Lake in Anhui Province

WANG Wan-fen¹, WU Yan¹, LIU Chang-li², CHU Jin-yu³

(1. City Construction and Environment Department, West Anhui University, Lu'an, Anhui 237012, China;
2. Chemistry and Life Science Department, West Anhui University, Lu'an, Anhui 237012, China; 3. Environmental Institute, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: Utilizing the monitoring data of Wanfu Lake from 2001 to 2007 in Anhui Province, adopting synthetic evaluation (TLI) method to evaluate eutrophication and based on the grey system theory of constructing three gray dynamic model groups composed of GM(1, 1) to forecast the nutrient salt changing tendency of Wanfu Lake, the results indicate that the comprehensive nutrition condition indexes of Wanfu Lake in 2007 is 33.537, which lies in the nutritional level, the eutrophication degree is influenced by water period slightly, and shows that by the means of the grey system theory the density of TN increases dramatically while the density of TP decreases remarkably. The gray dynamic model group method, which uses statistical average of model groups as the final prediction and avoids the instability of only one gray model method, can make full use of recent water quality data to forecast the changing trend. And prediction result is greatly meaningful for protecting the local drinking water and sustainable developing fresh water resource.

Key words: gray dynamic model group; nutrients; eutrophication evaluation; Wanfu Lake

水库是人工湖泊, 不同于河流或海洋, 它有自己的污染特征。水库地表水的污染来源广、途径多、种类复杂, 河系流域周围生活污水、工业废水排放, 农业径流以及畜牧、水产、旅游的影响, 造成了氮、磷、有机碳等营养元素大量进入水库。水库属于封闭性或半封闭性水域, 容易因营养成分的积累而出现富营养化现象^[1]。

目前, 湖泊(水库)富营养化评价采用较多的有营养物浓度评价、生物指标评价和综合评价 3 种方法, 前 2 种方法侧重某一方面进行富营养化评价, 得出的结论比较片面, 而综合评价是采用多个指标进行评价, 能够比较全面地反映出水体的营养程度^[2]。由于传统的水质预测方法如污染源调查法、季节性肯达尔检验法、线性回归预测法、滑动平均法等困难

^{*} 收稿日期: 2009-01-03

基金项目: 省教育厅自然科学研究重点项目 (KJ2008A138); 六安市定向委托皖西学院市级研究项目 (2008LW025); 省教育厅自然科学研究一般项目 (KJ2009B293Z)

作者简介: 汪万芬 (1975—), 女, 安徽六安人, 讲师, 硕士, 主要从事水环境评价方面的研究。E-mail: wanfenwang@wxc.edu.cn

以获得完整系统的污染源调查资料,加之水质信息的不完全性,给这些预测方法的使用带来了很大困难。而灰色系统分析方法对于信息不完整或不完整的实际情况具有良好的适用性^[3],其中的 GM(1,1)模型在水质预测中得到了较为广泛的运用^[4-5],但多属于单一灰色 GM(1,1)预测模型形式,难以克服由不稳定信息(如部分监测值偏大或偏小)给预测结果带来的不利影响。本文采用灰色动态模型群法,利用不同时段数据建立不同的灰色 GM(1,1)模型来构造灰色预测模型群,分别对未来时刻的各项预测值进行统计,并将统计平均值作为最终预测值。该法有效地克服了由不稳定信息带来的不利影响,进一步提高了预测的精度和预测结果的可靠性^[6]。因此,本文采用综合评价法(TLI)和 GM(1,1)模型群法对安徽万佛湖富营养化状况进行评价和预测,评价与预测结果较为可靠,对当地的饮用水源保护以及淡水资源持续开发利用都具有借鉴意义。

表 1 2007 年万佛湖年均监测值

监测项目	COD _{Mn} / (mg ·L ⁻¹)	TP/ (mg ·L ⁻¹)	TN/ (mg ·L ⁻¹)	SD/ m	Chl-a/ (mg ·m ⁻³)
监测值	2.20 ±0.43	0.026 ±0.004	0.56 ±0.34	3.86 ±0.13	0.0042 ±0.0051

表 2 2001 - 2007 年万佛湖总氮、总磷年均监测值

指 标	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年
总氮	0.350 ±0.080	0.480 ±0.160	0.350 ±0.140	0.350 ±0.021	0.390 ±0.014	0.500 ±0.177	0.560 ±0.340
总磷	0.047 ±0.007	0.045 ±0.005	0.043 ±0.004	0.040 ±0.002	0.044 ±0.001	0.028 ±0.006	0.026 ±0.004

1.2 富营养化评价方法

1.2.1 综合营养状态指数评价法 综合营养状态指数评价法综合湖泊水库多项影响其富营养化进程的限制和影响因子,将其表示为指数形式,对水体营养状态进行连续分级表示的方法^[8-10]。

$$TLI() = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j) \tag{1}$$

式中: TLI() ——综合营养状态指数; TLI(j) ——第 j 种参数的营养状态指数; W_j ——第 j 种参数的营养状态指数的相关权重。

其中各参数的营养状态指数计算公式如下:

$$TLI(Chl-a) = 10(2.5 + 1.086\ln Chl-a) \tag{2}$$

$$TLI(TP) = 10(9.436 + 1.624\ln TP) \tag{3}$$

$$TLI(TN) = 10(5.453 + 1.694\ln TN) \tag{4}$$

$$TLI(SD) = 10(5.118 - 1.94\ln SD) \tag{5}$$

$$TLI(COD_{Mn}) = 10(9.463 + 2.661\ln COD) \tag{6}$$

1.2.2 相关权重的计算及其确定 如果将叶绿素 a 对营养状态的重要性定为 1,第 j 个参数和 Chl-a 的相关关系为 R_{ij} (j=1,2, ..., m),因为两参数间的相关关系相同,即 R_{ij} = R_{ji},所以每个参数对营养状态的相对重要性与相关系数 R_{ij}²成正比。第 j 个参数对营养状态指数的相对重要性归一化权重如下式^[11]:

1 资料与方法

1.1 研究区概况与数据来源

万佛湖是安徽省十大水库之一,位于六安市舒城县境内是著名的淠史杭灌区水源工程,总库容 9.02 亿 m³,水库流域面积为 1 111 km²,是以蓄洪、灌溉、供水为主要目的的人工调节的半封闭水体,是六安市、合肥市和其他沿库城镇的基本饮用水源。但随着社会经济的快速发展,人口的增加,大量工业废水、生活污水、农业废水等排入水库,逐渐加深了污染的负荷,使万佛湖渐显富营养化势态。

为了解万佛湖富营养化的发展趋势,以龙河口的常规水质监测资料为原始数据进行统计可以得到年平均值^[7],见表 1,2,选择综合评价法(TLI)和 GM(1,1)模型群法对安徽万佛湖富营养化状况进行评价和预测,可为水库富营养化防治和治理提供科学依据。

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

式中: r_{ij} ——第 j 个参数与叶绿素的相关关系; m ——选出的主要参数的个数。(一般取 3~4 个)。

中国湖泊(水库)的 Chl-a 与其他参数之间的相关关系 r_{ij} 及 R_{ij}² 值见表 3。

表 3 中国湖泊(水库)部分参数与 Chl-a 的相关关系

参数	Chl-a	TP	TN	SD	COD _{Mn}
r _{ij}	1	0.84	0.82	- 0.83	0.83
r _{ij} ²	1	0.7056	0.6724	0.6889	0.6889
W _j	0.2663	0.1879	0.1790	0.1834	0.1834

注: r_{ij} 来源于中国 26 个主要湖泊调查数据的计算结果。

1.2.3 湖泊(水库)营养状态分级 采用 0 - 100 的一系列连续数字对湖泊(水库)营养状态分级(表 4)。

1.3 预测方法

1.3.1 GM(1,1)模型群建模原理 依据 GM(1,1)单个模型的建模原理,要求建模采用的数据系列 x⁽⁰⁾(k) 中的数目应不少于 4 个。假定原始数据系列 x⁽⁰⁾(k) 中有 n 个数,含有原始数据系列中最后一位数的组合数为 (n - 3),则可建立起 (n - 3) 个子模型组成的灰色预测模型群^[11]。

表 4 湖泊(水库)营养状态分级标准

综合营养度		贫营养	中营养		富营养		
					50	TLI() 60	轻度富营养
TLI()		TLI() < 30	30	TLI() 50	TLI() > 50	60 TLI() 70	中度富营养
						TLI() > 70	重度富营养

以 $X^{(0)}(n-3), X^{(0)}(n-2), X^{(0)}(n-1), X^{(0)}(n)$ 建立第 1 个模型为

$$x_1^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{u_1}{a_1})e^{-a_1 k} + \frac{u_1}{a_1} \quad (7)$$

以 $X^{(0)}(n-4), X^{(0)}(n-3), X^{(0)}(n-2), X^{(0)}(n-1), X^{(0)}(n)$ 建立第 2 个模型为

$$x_1^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{u_2}{a_2})e^{-a_2 k} + \frac{u_2}{a_2} \quad (8)$$

以 $X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)$ 建立第 $n-3$ 个模型为

$$\hat{x}_{n-3}^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{u_{n-3}}{a_{n-3}})e^{-a_{n-3} k} + \frac{u_{n-3}}{a_{n-3}} \quad (9)$$

然后以这些模型群分别进行预测,再以不同时刻各模型预测值的算术平均数作为各时刻的预测值,即

$$x^{(1)}(k) = [\sum_{i=1}^{n-3} x_i^{(1)}(k)] / (n-3) \quad (10)$$

1.3.2 事前检验 下面以 TP 为例说明建模的事前检验^[12]。设原始序列为

$$x^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), x^{(0)}(4), x^{(0)}(5), x^{(0)}(6)] = (0.047, 0.045, 0.043, 0.040, 0.044, 0.028)$$

$$x^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3), x^{(1)}(4),$$

$$x^{(1)}(5), x^{(1)}(6)] = (0.047, 0.092, 0.135, 0.175, 0.219, 0.247)$$

对 $x^{(0)}$ 进行准光滑性检验,由

$$(k) = \frac{x^{(0)}(k)}{x^{(1)}(k-1)} \quad (11)$$

得 (3) $0.47 < 0.5$, (4) $0.30 < 0.5$, (5) $0.25 < 0.5$, (6) $0.13 < 0.5$ 。当 $k > 3$ 时准光滑条件满足。

检验 $x^{(1)}$ 是否具有准指数规律,由

$$^{(1)}(k) = \frac{x^{(1)}(k)}{x^{(1)}(k-1)} \quad (12)$$

得 $^{(1)}(3) = 1.47$, $^{(1)}(4) = 1.3$, $^{(1)}(5) = 1.25$, $^{(1)}(6) = 1.13$

当 $k > 3$ 时, $^{(1)}(k) \in [1, 1.5]$, $= 0.5$, 准指数规律满足,故可对 TP 建立 GM(1,1) 模型。同理,对 TN 进行事前检验,经检验也满足准指数规律,故也可对其建立 GM(1,1) 模型。

1.3.3 模型群建立及其检验 基于 2001 - 2007 年万佛湖总氮、总磷浓度值,运用上述方法建立 GM(1,1) 模型群,结果见表 5,6,表中 P 表示小误差概率, C 称为均方差比值。应用后验差方法检验模型精度^[12-14],结果表明模型的精度均满足要求。

表 5 TN 的 GM(1,1) 模型群及其检验

模型标号	GM(1,1) 预测模型	P	C	精度
1	$\hat{X}^{(1)}(t+1) = 1.6503e^{0.186160t} - 1.3003$	1.000	0.115	良好
2	$\hat{X}^{(1)}(t+1) = 2.3247e^{0.129970t} - 1.8447$	1.000	0.171	良好
3	$\hat{X}^{(1)}(t+1) = 17.8294e^{0.021960t} - 17.4794$	0.833	0.423	合格

表 6 TP 的 GM(1,1) 模型群及其检验

模型标号	GM(1,1) 预测模型	P	C	精度
1	$\hat{X}^{(1)}(t+1) = -0.3140e^{-0.146982t} + 0.3570$	1.000	0.390	合格
2	$\hat{X}^{(1)}(t+1) = -0.4717e^{-0.098930t} + 0.5167$	0.800	0.475	合格
3	$\hat{X}^{(1)}(t+1) = -0.69179e^{-0.078242t} + 0.6648$	0.833	0.476	合格

2 结果与分析

2.1 富营养化评价结果与分析

2.1.1 富营养化年度评价 根据 2007 年六安市水库水质监测资料选择叶绿素 a (Chl-a)、总磷 (TP)、总氮 (TN)、透明度 (SD)、高锰酸盐指数 (COD_{Mn}) 5 个参数作为评价因子,进行综合营养状态指数评价,

结果见表 7。

由表 7 可知万佛湖综合营养状态指数为 33.537,处于中营养水平,可见水库富营养化程度较低,水质较好。

2.1.2 富营养化水期评价 根据 2007 年万佛湖水期监测资料进行水期富营养化评价,说明水期对富营养化水平的影响,结果见表 8。

表 7 2007 年万佛湖富营养化评价结果

水库名称	TLI(COD _{Mn})	TLI(TP)	TLI(TN)	TLI(SD)	TLI(Chl-a)	TLI()	富营养化级别
万佛湖	22.071	35.360	41.358	24.977	40.585	33.537	中营养

表 8 万佛湖水期富营养化评价结果

水期	TLI(COD _{Mn})	TLI(TP)	TLI(TN)	TLI(SD)	TLI(Chla)	TLI()	富营养化级别
枯水期	20.833	35.044	34.415	24.910	37.632	31.150	中营养
平水期	22.669	35.360	46.018	25.027	29.035	31.456	中营养
丰水期	23.254	37.683	45.592	25.154	49.041	37.250	中营养

可见水库在枯水期、平水期、丰水期均处于中营养水平,但丰水期综合营养状态指数稍高,总体来说富营养化程度受水期影响较小。

2.2 预测结果与分析

以上述建立的 3 个 GM(1,1) 模型组成的模型群对 2007 年 TN 浓度进行预测,统计均值为 0.52 mg/L,与实际监测结果 0.56 mg/L 的相对误差为 7.14%;以这 3 个 GM(1,1) 模型组成的模型群对 2007 年 TP 浓度进行预测,统计均值为 0.030 mg/L,与实际监测结果 0.026 mg/L 的相对误差为 15.38%,根据文献[15]知模型可用于预测。应用建立的模型群对 2008 - 2012 年万佛湖 TN、TP 浓度进行预测,结果见表 9,10。

表 9 万佛湖 TN 浓度灰色动态模型群预测值

mg/L					
年份	模型 1	模型 2	模型 3	预测值	实测值
2001	-	-	0.35	0.35	0.35
2002	-	0.48	0.40	0.44	0.48
2003	0.35	0.32	0.40	0.36	0.35
2004	0.34	0.37	0.41	0.37	0.35
2005	0.41	0.42	0.42	0.42	0.39
2006	0.49	0.48	0.43	0.47	0.50
2007	0.59	0.54	0.44	0.52	0.56
2008	0.71	0.62	0.45	0.59	
2009	0.86	0.70	0.46	0.67	
2010	1.03	0.80	0.47	0.77	
2011	1.24	0.91	0.48	0.88	
2012	1.50	1.04	0.49	1.01	

表 10 万佛湖 TP 浓度灰色动态模型群预测值

mg/L					
年份	模型 1	模型 2	模型 3	预测值	实测值
2001	-	-	0.047	0.047	0.047
2002	-	0.045	0.046	0.046	0.045
2003	0.043	0.044	0.043	0.043	0.043
2004	0.043	0.040	0.040	0.041	0.040
2005	0.037	0.036	0.038	0.037	0.044
2006	0.032	0.033	0.034	0.033	0.028
2007	0.028	0.030	0.031	0.030	0.026
2008	0.024	0.027	0.029	0.027	
2009	0.021	0.025	0.027	0.024	
2010	0.018	0.022	0.025	0.022	
2011	0.015	0.02	0.23	0.019	
2012	0.013	0.018	0.021	0.017	

以万佛湖 2001 - 2007 年 TN、TP 实测值以及 2001 - 2012 年拟合的预测值绘制成图,如图 1 和图 2 所示。

由图 1 和图 2 可以看出,TN 浓度呈显著上升趋势,而 TP 浓度呈显著下降趋势。氮污染主要来源生活污水、工业废水和农业面源,由于近年来生活污水排放量的显著增加导致氮污染加重;而随着无磷洗涤剂与洗衣粉的推广,生活污水中磷排放量下降显著,磷污染源相对较易控制,致使总磷浓度呈下降趋势。随着点源控制工作的不断深入,城镇生活污水和农业面源治理成为万佛湖水环境改善的重要工作之一。

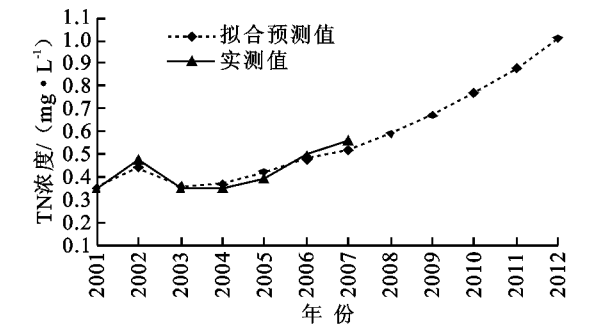


图 1 2001 - 2012 年 TN 浓度变化曲线

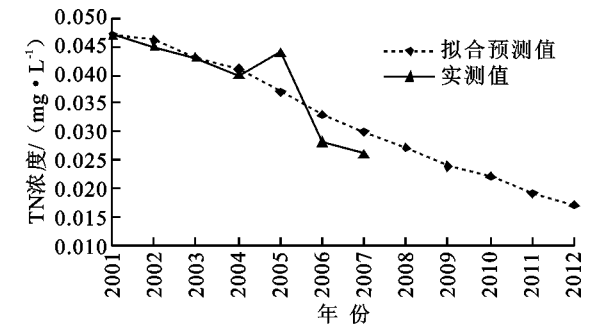


图 2 2001 - 2012 年 TP 浓度变化曲线

3 结 论

(1) 安徽万佛湖综合营养状态指数为 33.537, 处于中营养水平, 富营养化程度受水期影响较小。
(2) 运用灰色动态模型群法对安徽万佛湖营养盐进行预测, 结果表明 TN 浓度呈显著上升趋势, TP 浓度呈显著下降趋势。

参考文献:

[1] 马登军, 张凤娥, 高云霞, 等. 官厅水库富营养化的评价[J]. 中国环境监测, 2002, 18(1): 41-44.
[2] 孟红明, 张振克. 我国主要水库富营养化现状评价[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 133-136.
[3] 夏军. 区域水环境及生态环境质量评价: 多级灰关联评估理论与应用[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999.
[4] 胥冰, 韩小勇. 淮河干流水环境评价及其趋势分析[J]. 水资源保护, 1998(2): 10-17.
[5] 刘兰芬, 张祥伟, 夏军. 河流水环境容量预测方法研究[J]. 水利学报, 1998(7): 16-20.
[6] 张颖, 白羽军, 白听, 等. 西泉眼水库富营养化状况及浮

游藻类群落分析[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2007, 23(5): 523-525.
[7] 六安环保局. 2001 - 2007 年六安水资源质量报告书[S]. 2007: 111-113.
[8] 李嘉竹, 刘贤赵. 门楼水库营养化现状评价与治理对策[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 167-170.
[9] 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, 18(5): 47-49.
[10] 宋键, 金秉福, 张云吉. 烟台门楼水库氮磷营养盐的分布及其成因分析[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 321-324.
[11] 邓国立. 桃山水库富营养化研究[J]. 长春: 吉林大学, 2006.
[12] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 109-110.
[13] 李如忠, 汪家权, 钱家忠. 基于灰色动态模型群法的河流水质预测研究[J]. 合肥工业大学学报, 2002, 22(4): 10-12.
[14] 邓聚龙. 灰色系统预测与决策[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1985.
[15] 孙亚敏, 徐得潜. 巢湖营养盐负荷量的预测[J]. 工业用水与废水, 2000, 31(1): 3-5.

(上接第 78 页)

[4] 陈存及. 毛竹林的生态培育[J]. 福建林学院学报, 1996, 16(2): 188-192.
[5] 赵永艳. 竹阔混交林土壤性状与分析[J]. 南京林业大学学报, 2007, 31(1): 81-84.
[6] 黄启堂, 陈爱玲. 不同毛竹林林地土壤理化性质特征比较[J]. 福建林业科技, 2006, 26(4): 299-302.
[7] 王燕. 江西大岗山 3 种林型土壤水分物理性质研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 151-173.
[8] 龚辉. 建阳市森林结构调整的建模及仿真研究[J]. 福建林业科技, 2007, 27(2): 66-69.
[9] 安兴琴, 陈玉春. 浅议西北地区生态环境建设的气候效应[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(1): 116-119.
[10] 付为国, 李萍萍, 吴沿友. 镇江内江湿地不同演替阶段植物群落小气候日动态[J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1699-1704.
[11] 郭静, 姚孝友. 不同生态修复措施下鲁中山区土壤的水文特征[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(3): 342-349.
[12] 秦嘉海, 金自学. 祁连山不同林地类型对土壤理化性

质和水源涵养功能的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 92-94.
[13] 田大伦, 陈书军. 樟树人工林土壤水文 - 物理性质特征分析[J]. 中南林学院学报, 2005, 25(2): 1-6.
[14] 杨弘, 李忠. 长白山北坡阔叶红松林和暗针叶林的土壤水分物理性[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 272-276.
[15] 张希彪, 上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3685-3695.
[16] 郝占庆, 王力华. 辽东山区主要森林类型林地土壤蓄水性能的研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9(3): 237-241.
[17] 杨澄, 刘建军. 桥山森林土壤水分物理性质的分析[J]. 陕西林业科技, 1998(1): 24-27.
[18] 彭九生, 黄小春, 程平, 等. 江西毛竹林土壤肥力变化规律初探[J]. 世界竹藤通讯, 2003, 1(4): 37-42.
[19] 徐秋芳, 姜培坤. 毛竹林地土壤养分动态研究[J]. 竹子研究汇刊, 2000, 19(4): 46-50.