

# 基于 ARIMA 模型的山西省水资源生态足迹时间序列分析

张勇<sup>1</sup>, 张治国<sup>1</sup>, 董晓辉<sup>1</sup>, 杜轶<sup>2\*</sup>, 李有华<sup>1</sup>, 郭汉清<sup>3</sup> (1. 山西省水土保持科学研究所, 山西太原 030013; 2. 山西农业大学资源环境学院, 山西太谷 030801; 3. 山西农业大学林学院, 山西太谷 030801)

**摘要** 运用水资源生态足迹模型计算了 2003~2012 年山西省水资源生态足迹, 并对 2013~2017 年山西省水资源生态足迹进行 ARIMA 模型时间序列预测分析。结果表明: ARIMA(2,1,1) 模型能够较好地拟合 2005~2012 年山西省水资源生态足迹变化, 并预测 2013~2017 年山西省人均水资源生态足迹变化, 误差不超过 10%。将 ARIMA 模型运用于生态足迹时间序列的模拟和预测中, 变静态分析为动态模拟, 具有很好的适应性, 能提高预测精度。

**关键词** ARIMA 模型; 水资源生态足迹; 时间序列; 山西省

**中图分类号** S181 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)22-053-03

## Time Series Analysis of Water Resources Ecological Footprint in Shanxi Province Based on ARIMA Model

ZHANG Yong, ZHANG Zhi-guo, DONG Xiao-hui, DU Yi\* et al (Shanxi Soil and Water Conservation Institute of Science, Taiyuan, Shanxi 030045)

**Abstract** The model of ecological footprint on water resources was applied to calculate water resources from 2003 to 2012 in Shanxi Province. At the same time, the model of ARIMA was used to prospect ecological footprint of water resources in Shanxi Province from 2013 to 2017. The results showed that the model of ARIMA(2,1,1) could better fit the change of ecological footprint on water resources from 2005 to 2012. And the prediction error of per capita ecological footprint change was not more than 10%. It was suitable to predict and simulate the change of ecological footprint, and the prediction accuracy could be improved.

**Key words** ARIMA model; Ecological footprint on water resources; Time series; Shanxi Province

自生态足迹(Ecological Footprint)由 Ree 和 Wackernagel<sup>[1-2]</sup>提出以来,作为一种测度可持续发展水平的方法,被广泛应用。1999 年徐中民等<sup>[3]</sup>将该理论引入我国,现已被大多学者接受。然而,生态足迹模型对研究对象动态变化分析及未来预测均存在一定的缺陷。为弥补这方面不足,国内外学者进行了尝试性的探索。Senbel 等<sup>[4]</sup>在 3 种不同假设的基础上计算了 1926~1995 年澳大利亚的生态足迹,但是未讨论生态足迹未来发展趋势。Ediger 等<sup>[5]</sup>以北美为研究对象,运用情景分析法,预测了 21 世纪的生态赤字,但是该方法随机性强,不确定性大。岳东霞等<sup>[6]</sup>采用“变化率”和“剪刀差”的方法预测了 2005~2015 年甘肃省生态足迹发展趋势,但是该方法会随着数据量的增加而不断增加误差,且不能处理波浪状或阶梯状变化的时间序列样本。显然,生态足迹预测方法的选择是目前亟待解决的问题。笔者运用时间序列分析模型 ARIMA,借助分析软件 Eviews 6.0 和 SAS 9.2,对 2003~2012 年山西省水资源生态足迹计算结果进行建模分析,并用该模型预测了 2013~2017 年山西省水资源生态足迹,验证了 ARIMA 模型对生态足迹进行模拟和预测的可行性。

## 1 研究区概况

山西省位于 110°15'~114°32' E, 34°36'~40°44' N, 地处黄河中游, 四邻河北、陕西、河南和内蒙古。土地总面积为 15.6 万 km<sup>2</sup>, 占全国总面积的 1.6%。境内大小河流有 1 000

余条, 汾河、沁河、涑水河、三川河、昕水河等 142 条属黄河水系, 流域面积占 62%; 桑干河、滹沱河、漳河等 81 条属海河水系, 流域面积占 38%。多年平均水资源量为 142 亿 m<sup>3</sup>, 河川径流量 114 亿 m<sup>3</sup>。近年来, 由于水资源供给严重不足, 阻碍了山西省 PREE(人口、资源、生态和经济)系统的持续发展。

## 2 水资源生态足迹计算

研究数据来源于《山西统计年鉴(2003~2012 年)》<sup>[7]</sup>和《山西省水资源公报(2003~2012 年)》<sup>[8]</sup>。

水资源总生态足迹是生活用水生态足迹、生产用水生态足迹和生态环境用水生态足迹之和, 计算公式:

$$W_{EF} = N \sum_{i=1}^3 w_{ef_i} = N \sum_{i=1}^3 \gamma \frac{AW_i}{AP}$$

式中,  $W_{EF}$  为水资源总生态足迹, hm<sup>2</sup>;  $N$  为区域人口总数, 人;  $i$  为水资源类型;  $w_{ef_i}$  为第  $i$  类水资源类型的人均水资源生态足迹, hm<sup>2</sup>/cap;  $\gamma$  为全球水资源均衡因子, 取 5.19<sup>[9]</sup>;  $AW_i$  为第  $i$  类水资源人均消耗水资源量, m<sup>3</sup>;  $AP$  为水资源全球平均生产能力, 取 3 140 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup><sup>[9]</sup>。2003~2012 年山西省人均水资源生态足迹计算结果见表 1。

表 1 2003~2012 年山西省人均水资源生态足迹计算结果

Table 1 Calculation results of water resources ecological footprint per capita in Shanxi Province from 2003 to 2012 hm<sup>2</sup>/人

年份 Year	生态足迹 Ecological footprint	年份 Year	生态足迹 Ecological footprint
2003	0.372 4	2008	0.369 4
2004	0.367 7	2009	0.363 4
2005	0.393 6	2010	0.406 1
2006	0.388 9	2011	0.457 1
2007	0.383 2	2012	0.449 9

**基金项目** 山西省软科学基金项目(2016041027-4); 山西农业大学科技创新基金项目(20132-15); 山西省水利科学技术研究项目(晋水财务[2013]303)。

**作者简介** 张勇(1978-), 男, 山西吕梁人, 高级工程师, 硕士, 从事水土保持和土地生态研究。\* 通讯作者, 讲师, 硕士, 从事土地资源可持续利用研究。

**收稿日期** 2016-06-22

### 3 ARIMA 模型建立

**3.1 ARIMA 模型的原理** 1970 年美国统计学家 Geopre E. P. Box 和英国统计学家 Gwilym M. Jenkins 提出了一种关于时间序列分析预测与控制的模型,即 ARIMA 模型,又称为 Box-Jenkins 法<sup>[10-11]</sup>。受多因素和多因子的影响,生态足迹时间序列为非平稳时间序列,而 ARIMA 模型可将非平稳时间序列转化为平稳时间序列后进行预测。ARIMA 模型根据原序列是否平稳以及回归中所含部分的不同,包括 MA、AR、ARMA 和 ARIMA 4 个过程,其基本原理是一个非平稳时间序列  $x_t$  经  $d$  次差分成分平稳时间序列  $X_t$ ,使得  $X_t$  满足 ARMA( $p, q$ )模型:

$$(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i B^i) X_t = (1 + \sum_{j=1}^q \theta_j B^j) \varepsilon_t$$

式中,  $\phi_i$  为自回归参数,  $\theta_j$  为滑动平均参数,  $\varepsilon_t$  为零均值的白噪声序列,  $p$  为自回归模型的阶数,  $q$  为移动平均阶数,  $B$  为后移算子。

经过  $d$  阶差分后的 ARIMA( $p, d, q$ )模型:

$$(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i B^i)(1 - B)^d X_t = (1 + \sum_{j=1}^q \theta_j B^j) \varepsilon_t$$

该模型是笔者在该研究中采用的预测模型。

**3.2 ARIMA 模型的构建** 通过识别、估计和预测 3 个阶段之后,可以选择出基于若干拟合优度检验的合适模型。

**3.2.1 平稳性检验。**生态足迹序列平稳与否,可采用 ADF (Augmented Dickey-Fuller)方法进行检验,即可确定  $d$  值。

(1)对 2003~2012 年山西省人均水资源生态足迹进行时间序列  $x_t$  平稳性检验,绘制  $x_t$  时序(图 1)。从图 1 可见,2003~2012 年山西省人均水资源生态足迹在 0.39 左右,波动比较平稳,但存在略微趋势。经 ADF 检验,结果见表 2。由表 2 可知,单位根检验统计值  $\tau = 1.013 5$ ,均大于显著水平分别为 1%、5% 和 10% 的临界值。因此,可以认为,2003~2012 年山西省人均水资源生态足迹的时间序列  $x_t$  存在单位根,不平稳且带有趋势。

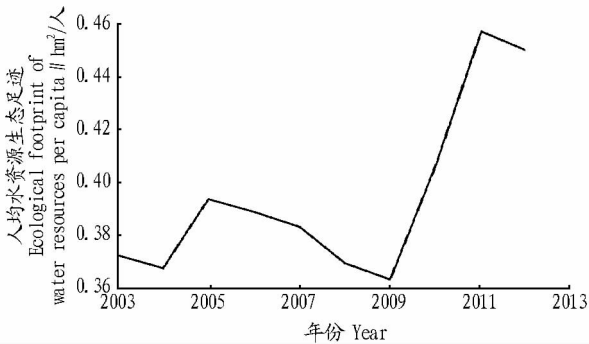


图 1  $x_t$  时序

Fig. 1  $x_t$  time series

(2)对 2003~2012 年山西省人均水资源生态足迹时间序列  $x_t$  施行一阶差分后进行序列  $X_t$  平稳性检验。绘制  $X_t$  时序(图 2)。从图 2 可看出,2003~2012 年山西省人均水资源生态足迹经过一阶差分后序列平稳,进一步对差分后的序列进行单位根检验,结果见表 2。由表 2 可知,单位根检验统计值  $\tau = -2.915 4$  小于水平为 10% 和 5% 的临界值,因此可

认为序列  $X_t$  平稳,确定  $d = 1$ 。

表 2 序列的单位根检验结果

Table 2 Results of unit root test of series

变量 Variable	ADF 值统计量 Statistics value of ADF value	$\tau$ 值 显著水平 Significant level//%	临界值 Critical value
$x_t$	1.013 5	1	-2.847 3
		5	-1.988 2
		10	-1.600 1
$X_t$	-2.518 5	1	-3.007 4
		5	-2.021 2
		10	-1.597 3

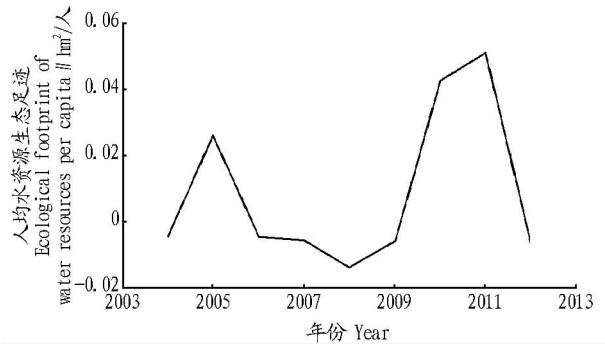


图 2  $X_t$  时序

Fig. 2  $x_t$  time series

**3.2.2 ARIMA 模型的识别。**对一阶差分后的平稳序列  $X_t$  进行自相关-偏自相关分析,根据观察相关图的截尾、拖尾特性,初步选择自回归阶数  $p$  和滑动平均阶数  $q$  的可能取值,选定几个可能的初步 ARIMA 模型。2003~2012 年山西省人均水资源生态足迹时间序列  $x_t$  施行一阶差分后序列  $X_t$  的自相关-偏自相关分析结果见图 3。从图 3 可以看出,经过一阶差分的序列  $X_t$  的 AC 值和 PAC 值都是截尾的,AC 函数在二次滞后呈现递减状态,PAC 函数是二次滞后呈现递减,可以考虑  $p = 2, q = 2$  或 3。

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob
1	0.137	0.137	0.232	2	0.630
2	-0.311	-0.336	1.595	9	0.450
3	-0.253	-0.172	2.650	7	0.449
4	-0.138	-0.210	3.028	2	0.553
5	0.093	-0.005	3.243	3	0.663
6	0.102	-0.072	3.589	1	0.732
7	-0.175	-0.273	5.107	3	0.648
8	0.044	0.099	5.299	0	0.725

图 3 序列  $X_t$  的 AC 和 PAC

Fig. 3 AC and PAC of series

**3.2.3 模型参数估计。**平稳序列  $X_t$  是原始序列  $x_t$  的一阶差分,  $d$  取值 1,可以初步建立的模型有 ARIMA(2,1,1)、ARIMA(2,1,2)、ARIMA(2,1,3)。分别对这 3 个备选模型依据 AIC 准则和 SBC 准则选择相对较优的模型,并对选定的模型进行参数估计。备选模型的信息准则 AIC、SBC 输出结果见表 3。由表 3 可知,一阶差分平稳序列  $X_t$  的 AIC 最小信息量是 -36.736 6,选择 ARIMA(2,1,2);SBC 最小信息量是 -35.766 3,选择 ARIMA(2,1,1)。由于 ARIMA(2,1,2)与

ARIMA(2,1,1)的 AIC 信息量接近,且考虑到模型的简洁性,综合分析,最后选定模型 ARIMA(2,1,1)。

表 3 备选模型的 AIC、SBC 输出结果

Table 3 AIC and SBC output result of alternative model

ARIMA 模型 ARIMA model	AIC	SBC
ARIMA(2,1,2)	-36.736 6	-35.750 5
ARIMA(2,1,1)	-36.555 2	-35.766 3
ARIMA(2,1,3)	-34.764 8	-33.581 4

**3.2.4 模型 ARIMA(2,1,1)残差的白噪声检验。**参数估计后,对模型进行检验,即对模型的残差序列进行白噪声检验。若残差序列不是白噪声序列,意味着残差序列还存在有用信息未被提取,需要进一步改进模型。残差的白噪声检验表明,滞后 6 阶的检验统计量的值为 3.73,相应的  $p$  值为 0.292 6,显著大于 0.05,说明该模型的残差序列为白噪声序列,即选定的 ARIMA(2,1,1)模型显著有效,能相对较好地描述有关观测数据。建立的模型 ARIMA(2,1,1)具体形式是:

$$(1 - 1.140\ 24B + 0.602\ 01B^2)(1 - B)x_t + 0.005\ 18 = (1 - 0.999\ 81B)\varepsilon_t$$

**3.2.5 模型检验与数据预测。**运用模型 ARIMA(2,1,1)计算 2005 ~ 2012 年山西省人均水资源生态足迹,结果见表 4。由表 4 可知,在 95% 的置信区间内,2005 ~ 2012 年生态足迹预测结果与实际值之间的误差较小,基本不超过 10%,预测结果具有较高的精度,说明该模型是合理的,可以对未来的生态足迹进行预测。利用模型 ARIMA(2,1,1)预测 2013 ~ 2017 年山西省人均水资源生态足迹,结果见表 4。

从图 4 可以看出,运用 ARIMA(2,1,1)模型对 2005 ~ 2012 年山西省人均水资源生态足迹进行内推预测时,山西省人均水资源生态足迹在 2005 ~ 2012 年整体预测趋势为中间有一定的起伏波动,但总体仍呈现增长态势,到 2012 年增加到最高值 0.421 1 hm<sup>2</sup>/人,这样的预测趋势与实际走势基本相一致。2013 ~ 2017 年山西省人均水资源生态足迹总体呈上升态势。

表 4 2005 ~ 2017 年山西省人均水资源生态足迹预测及其误差

Table 4 Prediction and error of ecological footprint of water resources per capita in Shanxi Province from 2005 to 2017

年份 Year	预测值 Predicted value hm <sup>2</sup> /人	实际值 Actual value hm <sup>2</sup> /人	实际值和预测值差值 Difference between predicted value and actual value//hm <sup>2</sup> /人	误差 Error %
2005	0.369 2	0.393 6	0.024 4	6.199 187
2006	0.376 2	0.388 9	0.012 7	3.265 621
2007	0.385 6	0.383 2	-0.002 4	-0.626 305
2008	0.385 6	0.369 4	-0.016 2	-4.385 490
2009	0.394 2	0.363 4	-0.030 8	-8.475 509
2010	0.405 0	0.406 1	0.001 1	0.270 869
2011	0.414 4	0.457 1	0.042 7	9.341 501
2012	0.421 1	0.449 9	0.028 8	6.401 423
2013	0.425 5			
2014	0.428 8			
2015	0.432 4			
2016	0.436 8			
2017	0.442 1			

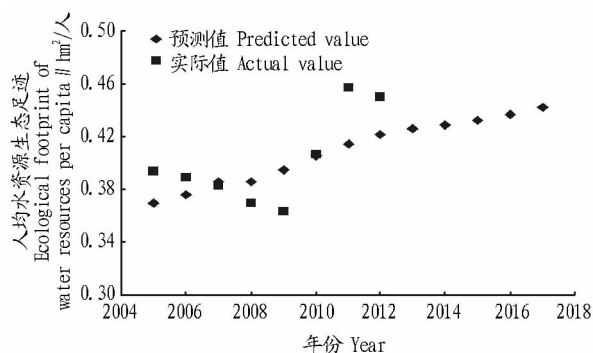


图 4 2005 ~ 2017 年山西省人均水资源生态足迹趋势

Fig. 4 Trend of ecological footprint of water resources per capita in Shanxi Province from 2005 to 2017

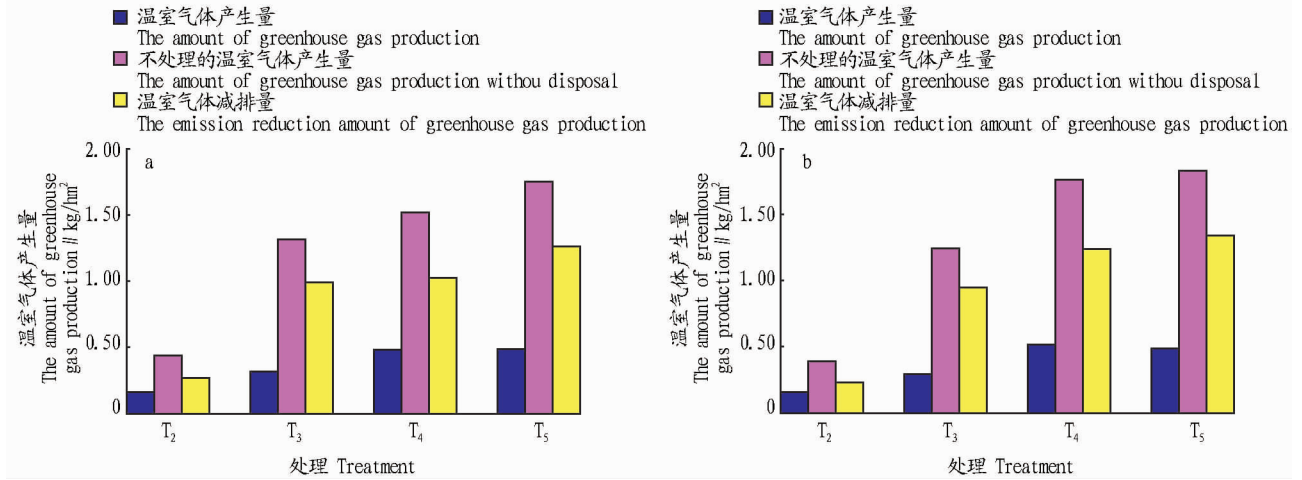
4 结论

(1) 运用生态足迹模型,对 2003 ~ 2012 年山西省水资源

人均生态足迹进行了测算。结果表明,10 年间山西省人均水资源生态足迹呈波动式上升,这必然会严重影响该区域水资源的可持续利用。

(2) 将 ARIMA 模型运用于生态足迹时间序列的模拟和预测中,可以变静态分析为动态模拟,提高了预测精度,这是对短期预测方法的补充。

(3) 采用 ARIMA 模型,通过 Eviews 6.0 和 SAS 9.4 软件对 2003 ~ 2017 年山西省人均水资源生态足迹进行了预测与分析,结果表明,2013 ~ 2017 年山西省水资源生态足迹仍然呈现上升趋势,水资源问题逐渐凸显,表明山西省未来水资源仍然承受较大压力。未来山西省想要实现水资源的可持续利用,须采取一定的有效措施。可以考虑从以下几个方面来实施:①水资源配置方面,应按主体功能区进行划分,坚持限制开发区不配置的原则;②水资源利用方面,优先使用地



注:a、b 分别为小麦、水稻季稻麦轮作猪粪-秸秆还田处理温室气体排放量。温室气体产生量按 CO<sub>2</sub> 干基计算。

Note:a,b is amount of greenhouse gas production under rice-wheat rotation with swine manure-straw returning in wheat season and rice season respectively, the amount of greenhouse gas production is calculated according to the carbon dioxide dry basis.

图 1 稻麦轮作猪粪-秸秆还田处理温室气体排放量

Fig. 1 The amount of greenhouse gas production under rice-wheat rotation with swine manure-straw returning

## 参考文献

- [1] 马永喜,王颖. 规模化畜牧养殖废弃物处理的环境经济优化研究:基于生态经济模型的分析[J]. 农业现代化研究,2014,35(3):341-344.
- [2] 龚俊勇,彭小珍,廖新伟. 广东省梅州市农地畜禽粪便环境风险评价[J]. 生态与农村环境学报,2011,27(3):25-28.
- [3] KO H J, KIM K Y, KIM H T, et al. Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure[J]. Waste management, 2008, 28(5): 813-820.
- [4] 方颖,赵敏燕,吴以中,等. 太湖流域畜禽养殖不同污染减排模式的环境绩效评价[J]. 环境科学与技术,2014,37(6N):312-350.
- [5] 王成贤,石德智,沈超峰,等. 畜禽粪便污染负荷及风险评估:以杭州市为例[J]. 环境科学学报,2011,31(11):2562-2569.
- [6] 贾中涛,王文亮,汤建华,等. 畜禽粪便有机肥与氮肥配施对玉米土壤理化性状的影响[J]. 环境科学与技术,2015,38(6P):34-39.
- [7] MAHANTA D, BHATTACHARYA R, GOPINATH K A, et al. Influence of farmyard manure application and mineral fertilization on yield sustainability, carbon sequestration potential and soil property of gardenpea-french bean cropping system in the Indian Himalayas[J]. Scientia horticulturae, 2013, 164:414-427.
- [8] 李江涛,钟晓兰,赵其国. 畜禽粪便施用对稻麦轮作土壤质量的影响[J]. 生态学报,2011,31(10):2837-2845.
- [9] 苗相伟,王国东,曹坤,等. 免耕秸秆还田对土壤生态特性及作物生长发育的影响[J]. 辽宁农业科学,2015(2):54-57.
- [10] 靳贞来,靳宇恒. 国外秸秆利用经验借鉴与中国发展路径选择[J]. 世界农业,2015(5):129-433.
- [11] 魏赛金,李昆太,涂晓喙,等. 稻草还田配施化肥与腐秆菌剂下的土壤微生物及有机碳组分特征[J]. 核农学报,2012,26(9):1317-1321.
- [12] 谭周进,李倩,李建国,等. 稻草还田量对晚稻土壤微生物数量及活度的动态影响[J]. 农业环境科学学报,2006,25(3):670-673.
- [13] 史然,陈晓娟,沈建林,等. 稻田秸秆还田的土壤增碳及温室气体排放效应和机理研究进展[J]. 土壤,2013,45(2):193-198.
- [14] 李明德,吴海勇,聂军,等. 稻草及其循环利用后的有机废弃物还田效用研究[J]. 中国农业科学,2010,43(17):3572-3579.
- [15] 安丰华,王志春,杨帆,等. 秸秆还田研究进展[J]. 土壤与作物,2015,4(2):57-63.
- [16] 张婷,李志洪,赵传拓,等. 秸秆还田对土壤肥力及作物生长的影响研究进展[J]. 安徽农业科学,2015,43(21):89-91.
- [17] 李瀚,邓欧平,胡佳,等. 成都平原农业废弃物施用下稻田田面水氮磷动态变化特征[J]. 农业环境科学学报,2015,34(3):485-493.

(上接第 55 页)

表水,控制使用地下水,提高用水效率,加强清洁生产;③水资源保护方面,划定红线,加大宣传力度,提高群众水资源保护意识;④水资源管理方面,实施总量控制,指标分解,水权出让,超额加价,严格管理,将水资源监测纳入管理环节,重点掌握动态,防治污染,保证用水安全。

## 参考文献

- [1] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. Environment and urbanization, 1992,4(2):121-130.
- [2] WACKERNAGEL M, ONISTO L, BELLO P. National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J]. Ecological economics, 1999,29(3):375-390.
- [3] 徐中民,程国栋,张志强. 生态足迹方法:可持续性定量研究的新方法:以张掖地区 1995 年的生态足迹计算为例[J]. 生态学报,2001,21(9):1484-1493.
- [4] SENBEL M, MCDANIELS T, DOWLATABADI H. The ecological footprint: A nonmonetary metric of human consumption applied to North America[J]. Global environmental change, 2003,13(2):83-100.
- [5] EDIGER V S, AKAR S, UGURLU B. Forecasting production of fossil fuel sources in Turkey using a comparative regression and ARIMA model[J]. Energy Policy, 2006,34(18):3836-3846.
- [6] 岳东霞,李白珍,惠苍. 甘肃省生态足迹和生态承载力发展趋势研究[J]. 西北植物学报,2004,24(3):454-463.
- [7] 山西省统计局. 山西统计年鉴:2003~2012 年[R]. 北京:中国统计出版社,2003-2012.
- [8] 山西省水利厅. 山西省水资源公报:2003~2012 年[R]. 山西:山西省水利厅,2003-2012.
- [9] 黄林楠,张伟新,姜翠玲,等. 水资源生态足迹计算方法[J]. 生态学报,2008,28(3):1279-1286.
- [10] BOX G E P, JENKINS G M, REINSEL G C. Time series analysis: Forecasting and control [M]. 3rd ed. NY: Prentice-Hall Inc., 1994.
- [11] DER VOOT M V, DOUGHERTY M, WATSON S. Combining KOHOEN maps with ARIMA time series model to forecast traffic flow[J]. Transportation research, 1996, 4(5): 307-318.