

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.03.010

和谐论在水资源承载力综合评价中的应用

孟珍珠¹,唐德善¹,魏宇航¹,张范平²

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 江西省水利科学研究院,江西 南昌 330029)

摘要:以人水和谐的理论为核心,以“健康、发展、协调”为 3 大量化准则,构建了基于和谐论的水资源承载力评价指标体系。并以阜阳市为例,构造层次分析-模糊综合评判模型对该市各县区的水资源承载力进行综合评价。结果表明,阜阳市整体水资源承载力较差,且各县区水资源的承载能力不均衡,沿淮县市情况相对较好。

关键词:水资源承载力;和谐论;模糊综合评价;层次分析法

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)03-0054-05

Application of harmony theory to evaluation of water resources carrying capacity

MENG Zhenzhu¹, TANG Deshan¹, WEI Yuhang¹, ZHANG Fanping²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangxi Institute of Water Science and Technology, Nanchang 330029, China)

Abstract: According to the core concept of human-water harmony and the criteria of health, development, and harmony, we established a water resources carrying capacity evaluation index system based on the harmony theory. Taking Fuyang City as a case study, we built the AHP-fuzzy comprehensive evaluation model to assess the water resources carrying capacity of the counties and districts in Fuyang City. The results show that the city has poor water resources carrying capacity on the whole, and the capacity is unbalanced in the counties and districts; the situation in the counties and cities near the Huaihe River is better than in those far away from the river.

Key words: water resources carrying capacity; harmony theory; fuzzy comprehensive evaluation; AHP

城市是社会发展的主要区域,水资源是城市发展的必备条件,而水资源承载力是指导城市生态建设和制定经济发展规划的基础。城市的迅速发展导致水问题越来越严峻,给水资源带来了巨大压力,水资源在社会经济发展中的角色也愈发重要。从 20 世纪 80 年代起,许多学者开展了人-水之间相互关系的研究,也已有诸多学者采用不同方法、不同模型,如常规趋势法、系统动力学法、综合评价法及多目标分析法等,从不同角度对水资源承载力进行评价,并且取得良好的评价结果。Ding 等^[1-2]研究了人水之间的复杂关系,分析了水资源系统的变化和不确定性,进行城市人水和谐的研究。左其亭等^[3]提出了城市人水和谐的量化准则。

笔者借鉴已有的水资源承载力指标构建和评价方法,结合阜阳市当地的水资源实际特征,首先,依据人水和谐中“健康、发展、协调”的 3 大量化准则,建立了以和谐论为核心的水资源承载力评价准则;然后,利用层次分析法来计算评价指标的权重系数,并结合模糊综合评判法对其进行模糊处理,建立了 AHP-模糊综合评判模型对阜阳市的水资源承载力

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2012CB417006)

作者简介:孟珍珠(1990—),女,硕士研究生,研究方向为水利水电系统规划与工程经济。E-mail: zhenzhu.meng@hotmail.com

通信作者:唐德善,教授。E-mail: tds808@163.com

进行定量评价。

1 基于和谐论的水资源承载力评价指标体系构建

1.1 代表性指标体系分析

水资源承载力评价指标体系是一个多因素、多目标的复杂的大系统,不仅与其系统自身特性有关,还取决于人类活动能力及意识形态等因素。构建合理的评价指标体系是公正、公平地评价区域水资源承载力的必要条件。当前关于水资源承载力指标的选取角度名目繁多,但多以满足社会经济发展的基本需求角度进行指标选取,对于人水和谐发展和支撑可持续发展能力的衡量和评估尚不完善,这就给城市人水关系的可持续发展带来了不确定性。现有国内代表性评价指标体系对比见表 1^[4]。

1.2 基于和谐论的指标体系构建

基于和谐论的水资源承载能力研究是指在人文系统与水系统相互协调的良性循环状态,即在不断改善水系统自我维持和更新能力的前提下,水资源能为人类生存和社会经济可持续发展提供的支撑和保障的能力。本文在选取指标时遵循科学性、整体性、定性定量相结合等原则的同时,在和谐论的理论框架下,以水循环为纽带,将人文系统与水系统联系在一起,水资源承载力和谐评价应包括以下 3 个量化准则^[10]:①健康:是指从水系统的角度考量水资源承载能力,如河流的自我修复能力、区域水资源总量、供水模数等方面,主要反映待评价区域的水资源天然禀赋,即水资源系统本身的质与量。②发展:主要从人文系统考量水资源承载力,特别是从社会经济角度实现社会经济的可持续发展,主要反映高效利用享有的资源支撑社会发展的规模和经济发展的程度。③协调:主要从人文系统和水系统之间的相互作用关系角度考量水资源承载力,主要指人文系统与水系统关系的发展状态,即水系统必须为人类及社会经济的发展提供必要支撑和安全保障,

主要反映水资源保障社会经济发展的可持续性。

在水资源承载力和谐评价指标筛选方面,根据人水和谐理论健康(水系统)、发展(人文系统)、协调(人文系统与水系统相互作用),首先采用频度分析法对以往的水资源承载力评价指标、城市人水和谐度评价指标、水资源可持续发展度评价指标等进行频率统计,使用频率高的指标作为初选指标,以初选指标构建专家咨询表,向相关专家发咨询表征求意见,在对咨询结果统计分析的基础上,以反映“和谐”为目标,对指标做进一步筛选并对指标进行分类,对其中的定量指标采用主成分分析法进行筛选,定性指标则采用德尔菲法进行筛选。

最终,确立基于和谐论的水资源承载力评价指标体系,由目标层、准则层、领域层及指标层 4 个层次量化指标组成体系框架。其中:①目标层,用水资源和谐承载力综合反映人文系统与水系统相互协调和发展的程度以及评价区域水资源承载力总体程度、总体态势和总体效果;②准则层,通过前文提出的“健康、发展和协调”3 个量化准则,分别从水系统、人文系统以及水系统与人文系统的相互作用及关系的角度来衡量人水系统的健康度、发展度和协调度;③领域层,每个准则包含的不同指标类型和方面;④指标层,是具体的量化指标,反映具体某个方面的水资源承载能力,每个领域层由多个具体指标构成。水资源承载力评价指标及说明见表 2。

在指标的筛选方面,结合研究区的实际情况对研究区和谐标准下的水资源承载能力进行评价,并判断等级。与传统的“社会-经济-生态”的水资源承载力评价指标体系相比,基于和谐论的指标体系有以下特点:①可反映出人-水复合系统协调、稳定、健康运行的状态;②不仅可以衡量水资源支撑人类社会的可持续发展的状况,而且可以反映水资源系统的自我更新和修复能力以及人类主动维持和改善水资源系统的循环状态。

表 1 代表性评价指标体系对比

作者	选取角度	指标体系选取	研究内容
惠泱河等 ^[5]	承载对象	主要反映经济效益和用水多少:单位耗水产值、万元工业增加值用水量、人均日用水量、亩均净灌溉定额、重复利用率等	从用水结构方面探讨水资源的供需平衡关系
程军蕊等 ^[6]	承载对象	主要反映水资源的承载指标和压力指标:供用水指标、水资源支撑指标、承载力评判指标等	从承载指数和水压力指数方面构建评判体系
王颖等 ^[7]	影响因素	主要通过水量分析评估水资源承载能力:开源(开采地下水、引水)和节流(合理制定水价、提高水资源利用效率)	从水环境和水资源两个方面分析水资源承载力与经济发展的关系
夏军等 ^[8] 、 朱一中等 ^[9]	影响因素	①水资源系统:人均用水量、水资源利用率、人均水资源量等; ②社会经济系统:城镇化水平、人口自然增长率、用水效率、人均工业增加值等; ③生态环境系统:COD 浓度、生态需水率、林草覆盖率等	在多目标情景分析的基础上,利用模糊综合评判法对西北地区现状、未来 10 年、20 年、50 年的水资源承载力进行对比评价

表 2 水资源承载力评价指标及说明

目标层 A	准则层 B	领域层 C	指标层 D	单位	指标说明
水资源承载力	健康	水资源	产水模数	万 m ³ /km ²	水资源总量/地区总面积
			水面率	%	卫星图像解译
			地下水资源量	亿 m ³	浅层地下水资源量
			降水量	mm	降水深度
		水生态	COD 排放量	t	监测值
			生态环境用水率	%	生态环境用水量/用水总量
			水功能区水质达标率	%	达标水功能区数量/水功能区总数
			污水处理率	%	污水处理量/污水排放总量
		社会	人口密度	人/km ²	总人口/城市总面积
			人口增长率	%	(年末人口数-年初人口数)/年平均人口数
			城镇化率	%	城镇人口/总人口
	发展	经济	GDP 增长率	%	本年度 GDP 增加额/上年度 GDP
			产业结构(一产占比)	%	第一产业产值/总产值
		技术	节水灌溉率	%	节水灌溉面积/总面积
			深层地下水供水率	%	深层地下水供水量/总供水量
			中水回用率	%	中水回用量/中水总量
		安全	地面沉降情况	无量纲	地质部门专家调查法
			饮用水水质满意度	%	调查问卷
			耕地保有量	km ²	耕地面积/总面积
	协调	水-社会	综合生活用水定额	L/(人·d)	城市居民日常生活用水和公共建筑用水
			水资源量	m ³ /人	水资源总量/人口
			用水量	m ³ /人	总用水量/人口
		水-经济	单位面积耕地用水量	m ³	农业用水总量/耕地面积
			万元工业增加值用水量	m ³	工业用水总量/工业年总产值
		水-环境	污径比	%	污水排放量/总水量
		人-水	公众满意度	%	调查问卷

2 案例应用

阜阳市是皖北水资源最匮乏的城市之一,市辖界首市和太和、临泉、颍上、阜南 4 县及颍州、颍泉、颍东 3 区,总面积 9 775 km²。由于城市发展规模的扩大和水问题的日益突出,水资源问题已经成为制约阜阳市可持续发展的重要瓶颈之一,因此,水资源承载力的研究对于阜阳市资源统筹、城市协调发展和城市空间布局有着重要意义。由于水资源承载力的不确定性和模糊性,本文采用层次分析法确定指标权重,模糊综合评判模型评价计算,以 2013 年为例对阜阳市的水资源承载能力进行综合评估,对该市未来外调水源基于和谐角度的内部配置有一定参考价值。

2.1 指标评价标准的划分

结合阜阳市水资源承载力的实际情况,并参考全国平均水平和安徽省平均水平,将其评价等级划分为强(V₁)、较强(V₂)、一般(V₃)、较弱(V₄)和弱(V₅)5 个等级,具体评价指标等级划分标准见表 3。

V₁ 表示水资源承载力水平很好,人水关系和谐,水资源不会成为城市可持续发展的限制因素;V₂ 表示水资源承载水平较好,水资源可以基本满足城市发展需求;V₃ 表示水资源承载力一般,基本满足

现状的水资源需求,但仍未达到人水和谐的状态,对城市未来可持续发展具有一定限制作用;V₄ 表示水资源承载力接近饱和,人水关系较不和谐,水资源对于城市发展的支撑潜力小;V₅ 表示水资源已无开发潜力,人水关系极端不和谐,水资源已经成为城市发展的制约条件。

2.2 权重系数的确定

根据已建立的评价指标体系,利用层次分析法计算各指标的权重^[11],计算出阜阳市水资源承载力评价指标体系中各指标的权重。对各单层次和总层次进行一致性检验后得到各指标权重 W(表 4)。

2.3 模糊综合评价方法

由于评价等级的模糊性和不确定性,使用模糊综合评判模型对其进行评价,能够更好地反映当地的水资源承载力状况。模糊综合评价方法主要将评价指标和等级分成两个有效论域 $U = \{u_1, u_2, \cdots, u_n\}$ 和 $V = \{v_1, v_2, \cdots, v_m\}$,两者之间进行单因素评价,得到模糊关系矩阵 R。

$$R = \begin{vmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{vmatrix}$$

(1)

式中,r_{ij}为 U 中第 i 个因素 u_i 对 V 中第 j 个等级 v_j 的相对隶属度。

表 3 水资源承载力评价指标等级划分标准

指标层 D		类型	单位	等级划分标准				
				强	较强	一般	较弱	弱
D_1	产水模数	正向	万 m ³ /km ²	>70	45 ~ 70	25 ~ 40	10 ~ 25	<10
D_2	水面率	正向	%	>10	6 ~ 10	4 ~ 6	2 ~ 4	<2
D_3	地下水资源量	正向	亿 m ³	>4	3 ~ 4	2 ~ 3	1 ~ 2	<1
D_4	降水量	正向	mm	>1 000	900 ~ 1 000	800 ~ 900	700 ~ 800	<700
D_5	COD 排放量	逆向	t	<500	500 ~ 1 000	1 000 ~ 2 000	2 000 ~ 3 000	>3 000
D_6	生态环境用水率	正向	%	>5	5 ~ 3	3 ~ 2	2 ~ 0. 8	<0. 8
D_7	水功能区水质达标率	正向	%	100	95 ~ 100	85 ~ 95	75 ~ 85	<75
D_8	污水处理率	正向	%	>95	90 ~ 95	85 ~ 90	80 ~ 85	<80
D_9	人口密度	逆向	人/km ²	<25	25 ~ 70	70 ~ 150	150 ~ 500	>500
D_{10}	人口增长率	逆向	%	<0. 2	0. 2 ~ 0. 6	0. 6 ~ 0. 8	0. 8 ~ 1. 2	>1. 2
D_{11}	城镇化率	逆向	%	<25	25 ~ 50	50 ~ 70	70 ~ 80	>80
D_{12}	GDP 增长率	逆向	%	>10	10 ~ 8	8 ~ 6	6 ~ 4	<4
D_{13}	产业结构(一产占比)	逆向	%	<10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	>40
D_{14}	节水灌溉率	正向	%	>90	80 ~ 90	60 ~ 80	50 ~ 60	<50
D_{15}	深层地下水供水率	逆向	%	<5	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 25	>25
D_{16}	中水回用率	正向	%	>80	60 ~ 80	40 ~ 60	20 ~ 40	<20
D_{17}	地面沉降情况	逆向	无量纲	<1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	>4
D_{18}	饮用水水质满意度	正向	%	>90	80 ~ 90	60 ~ 80	50 ~ 60	<50
D_{19}	耕地保有量	逆向	%	<55	55 ~ 60	60 ~ 65	65 ~ 70	>70
D_{20}	综合生活用水定额	逆向	L/(人·d)	>150	120 ~ 150	110 ~ 120	100 ~ 110	<100
D_{21}	水资源量	正向	m ³ /人	>2 000	1 000 ~ 2 000	500 ~ 1 000	200 ~ 500	<200
D_{22}	用水量	逆向	m ³ /人	<200	200 ~ 300	300 ~ 400	400 ~ 500	>500
D_{23}	单位面积耕地用水量	逆向	m ³	<100	100 ~ 150	150 ~ 200	200 ~ 300	>300
D_{24}	万元工业增加值用水量	逆向	m ³	<50	50 ~ 70	70 ~ 90	90 ~ 120	>120
D_{25}	污径比	逆向	%	<2	2 ~ 8	8 ~ 12	12 ~ 20	>20
D_{26}	公众满意度	正向	%	>90	80 ~ 90	70 ~ 80	60 ~ 70	<60

表 4 水资源承载力指标权重及待评价数值

指标	$B_1=0.3005$	$B_2=0.5021$	$B_3=0.1974$	权重	2013 年 阜阳市各区县各项指标值					单位	
					市区	临泉县	太和县	阜南县	颍上县		界首市
D_1	0.2675			0.0804	21.42	19.03	20.33	20.81	26.04	18.02	万 m ³ /km ²
D_2	0.1592			0.0478	2.55	2.43	1.79	2.92	3.39	1.81	%
D_3	0.1335			0.0401	3.04	2.52	2.34	2.78	3.06	0.91	亿 m ³
D_4	0.0917			0.0276	901	887	820	925	937	854	mm
D_5	0.1019			0.0306	4250	1396	1706	891	682	1233	t
D_6	0.0793			0.0238	1.124	0.375	0.361	0.277	0.377	1.333	%
D_7	0.0837			0.0252	100	100	100	100	100	100	%
D_8	0.0832			0.0250	91	85	82	87	76	94	%
D_9		0.0812		0.0408	959	849	748	661	644	844	人/km ²
D_{10}		0.0587		0.0295	1.55	1.13	1.11	1.45	1.66	0.64	%
D_{11}		0.0776		0.0390	62	38	42	37	46	54	%
D_{12}		0.0611		0.0307	12.3	8.7	9.5	8.6	9.9	11.6	%
D_{13}		0.1542		0.0774	18	33	29	37	25	22	%
D_{14}		0.1231		0.0618	89	83	92	84	85	83	%
D_{15}		0.1193		0.0599	17	20	24	15	11	19	%
D_{16}		0.0984		0.0494	4.5	2.2	1.8	0	0	2.7	%
D_{17}		0.0769		0.0386	3	0	0	0	0	0	无量纲
D_{18}		0.0473		0.0237	96	92	89	86	94	87	%
D_{19}		0.1022		0.0513	59	65	69	62	67	61	km ²
D_{20}			0.1324	0.0261	109.6	98.3	105.2	101.3	101.1	120.2	L/(人·d)
D_{21}			0.1594	0.0315	326	422	443	483	444	438	m ³ /人
D_{22}			0.1092	0.0216	224	160	153	225	378	238	m ³ /人
D_{23}			0.1943	0.0384	165	134	94	205	265	144	m ³
D_{24}			0.2011	0.0397	96	129	91	90	85	74	m ³
D_{25}			0.0955	0.0189	22.2	3.1	3.9	4.4	2.9	8.2	%
D_{26}			0.1081	0.0213	76	83	86	90	93	81	%

模糊矩阵 R 中的 r_{ij} 根据评价指标的实际数值及其相应的分级指标来确定。不同的隶属度函数将对控制特性产生不同影响,本文中采用“降半梯形分布图法”确立函数的隶属度,评价因子隶属度函数计算式如下:

$$u(x)=\begin{cases} 1 & x < a_1 \\ \frac{a_2-x}{a_2-a_1} & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 0 & x > a_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 为单因子样本值, a_1 、 a_2 分别为水资源承载力评价指标相邻分级的标准值。

通过上述模型可以分别得出水资源承载力各指标的权重 W 和模糊隶属度矩阵 R ,并得出最终评判矩阵 $B=WR$,求得相应水资源承载力评价等级并进行综合评价。

2.4 结果分析

基于上述权重和模型的计算,首先对待评价对象进行归一化处理,然后计算出评判矩阵 R ,最后由 $B=WR$ 得出阜阳市水资源承载力评价结果,求得阜阳市各县区的水资源承载能力综合评分值,计算式结果见表 5。

表 5 阜阳市水资源承载力横向评价结果

地 区	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	α
市 区	0.031 2	0.250 6	0.157 7	0.383 6	0.245 4	0.412 5
太和县	0.008 9	0.146 1	0.335 4	0.438 9	0.171 1	0.402 7
界首市	0.115 9	0.137 2	0.103 9	0.449 1	0.220 3	0.371 3
临泉县	0.023 3	0.167 9	0.189 4	0.299 2	0.309 8	0.335 2
颍上县	0.010 3	0.086 6	0.287 9	0.381 2	0.313 9	0.329 4
阜南县	0.009 7	0.108 5	0.189 2	0.438 8	0.315 6	0.311 2

由评价结果可知,阜阳市水资源承载力整体压力较大,其中,市区和太和县承载压力最大,其次为界首市、临泉县,沿淮城市颍上县和阜南县相对情况较好,说明阜阳市空间分布不均匀,城市的产业遴选和空间布局应考虑其水资源的实际承载能力,且对于未来外调水源的配置应侧重于中心城区、太和县等北部远淮城市。评价结果与当地实际调查的反映基本一致,评价结果合理。

3 结 语

在总结大量文献的基础上,对水资源承载力的代表性指标体系进行了归纳和总结,分析了其主要的指标选取依据和研究内容,并在人水和谐的基础上探讨了基于和谐论的水资源承载力的概念和内涵,并明确了“健康、发展、协调”3 大量化准则。根据量化准则,提出了基于和谐理论的水资源承载力指标体系,选取了 10 个领域层、共 26 项指标。结合层次分析法和模糊综合评价法,采用基于和谐理论

的水资源承载力指标体系,以阜阳市为例,分别对其辖管的 6 个县区的水资源承载力进行综合评价和横向对比分析,实例区的计算结果表明,阜阳市水资源承载整体状况不容乐观,从空间方面来看,远淮县市水资源承载压力大于沿淮县市,评价结果与实际情况相符。基于和谐理论的水资源承载力综合评价与传统的水资源承载力评价相比,能够比较客观地从和谐发展角度反映研究区的水资源承载程度。

参考文献:

[1] DING Y,TANG D,DAI H. Human-water harmony index:a new approach to assess the human water relationship[J]. Water Resources Management,2014,28(4):1061-1077.

[2] 戴会超,唐德善,张范平,等. 城市人水和谐度研究[J]. 水利学报,2013,44(8):973-986. (DAI Huichao,TANG Deshan,ZHANG Fanping,et al. Research on the human-water harmony degree of metropolis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (8): 973-986. (in Chinese))

[3] 左其享,张云. 塔里木河流域人水和谐定量评价及调控对策[J]. 干旱区地理,2008,31(3):154-174. (ZUO Qiting,ZHANG Yun. Quantitative evaluation and control measures of human water harmony for the Tarim River Basin[J]. Arid Land Geography,2008,31(3):154-174. (in Chinese))

[4] 栾芳芳,夏建新. 区域水资源承载力理论与方法对比[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(3):116-120. (LUAN Fangfang,XIA Jianxin. Comparison of theory and method of carrying capacity of regional water resources [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013,24(3):116-120. (in Chinese))

[5] 惠洪河,蒋晓辉,黄强,等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报,2000,21(1):30-34. (HUI Yanghe,JIANG Xiaohui,HUANG Qiang,et al. Research on evaluation index system of water resources bearing capacity [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000,21(1):30-34. (in Chinese))

[6] 程军蕊,曹飞凤,楼章华,等. 钱塘江流域水资源承载力指标体系研究[J]. 浙江水利科技,2006(4):1-3. (CHENG Junrui,CAO Feifeng,LOU Zhanghua,et al. Study on index system of water resources carrying capacity in Qiantang River Basin[J]. Zhejiang Hydrotechnics,2006(4):1-3. (in Chinese))

[7] 王颖,王腊春,王栋. 长江三角洲水资源水环境承载力、发展变化规律与永续利用之对策研究[J]. 水资源保护,2003,19(6):34-41. (WANG Ying,WANG Lachun,WANG Dong. Bearing capacity and regularity of development of water resources and water environment of Yangtze River Delta and measures for sustainable development [J]. Water Resources Protection, 2003, 19 (6):34-41. (in Chinese)) (下转第 116 页)

- Systematics and Evolution, 2008, 46 (5) : 754-771. (in Chinese))
 - [11] 边归国,刘国祥,陈克华,等. 福建龙岩市龙潭湖甲藻水华成因的研究[J]. 中国环境科学,2010,30(12) :1678-1682. (BIAN Guiguo, LIU Guoxiang, CHEN Kehua, et al. The possible cause of a *dinoflagellate* bloom occurring in Longtan Lake. [J] China Environmental Science, 2010, 30 (12) :1678-1682. (in Chinese))
 - [12] 洪专,高亚辉,易瑞灶,等. 赤潮毒藻塔玛亚历山大藻研究进展[J]. 海洋科学,2006,30(11) :82-87. (HONG Zhuan, GAO Yahui, YI Ruizao, et al. Advances in study of toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* [J]. Marine Science, 2006, 30(11) :82-87. (in Chinese))
 - [13] 齐雨藻,黄长江,钟彦,等. 甲藻塔玛亚历山大藻昼夜垂直迁移特性的研究[J]. 海洋与湖沼,1997,28(5) :458-467. (QI Yuzao, HUANG Changjiang, ZHONG Yan, et al. Laboratory study on the diurnal vertical migration of a poisonous red-tide dinoflagellate *Alexandrium tamarense* [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1997, 28(5) :458-467. (in Chinese))
 - [14] 胡鸿钧,李尧英,魏印心,等. 中国淡水藻类[M]. 上海:上海科学技术出版社,1980.
 - [15] 胡鸿钧,魏印心. 中国淡水藻类:系统分类及生态[M]. 北京:科学出版社,2006.
 - [16] 刘孝竹,李卓佳,曹煜成,等. 珠江三角洲低盐度虾池秋冬季浮游微藻群落结构特征的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (5) : 1010-1018. (LIU Xiaozhu, LI Zhuojia, CAO Yucheng, et al. Study on the characteristics of *planktonic microalgae* community structure of low salinity shrimp ponds during autumn and winter in Pearl River delta [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(5) :1010-1018. (in Chinese))
 - [17] 查广才,周昌清,黄建荣,等. 凡纳对虾淡化养殖虾池微型浮游生物群落及多样性[J]. 生态学报, 2004, 24 (8) : 1752-1759. (ZHA Guangcai, ZHOU Changqing, HUANG Jianrong, et al. Studies on the structure and biodiversity of the microplankton community in *Litopenaeus vannamei* desalination culture ponds [J]. Acta Ecology Sinica, 2004, 24(8) :1752-1759. (in Chinese))
 - [18] 刘雪花,赵秀侠,高攀,等. 安徽菜子湖浮游植物群落结构的周年变化(2010 年) [J]. 湖泊科学, 2012, 24 (5) : 771-779. (LIU Xuehua, ZHAO Xiuxia, GAO Pan, et al. Annual dynamics of phytoplankton abundance and community structure (2010) in Lake Caizi, Anhui Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(5) :771-779. (in Chinese))
 - [19] 王建国. 西泉眼水库浮游植物群落结构动态特征及其与水环境因子的关系分析[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2011.
 - [20] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990.
 - [21] 周凤霞,陈剑虹. 淡水微型生物图谱[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
 - [22] 韩茂森. 淡水浮游生物图谱[M]. 北京:农业出版社,1980.
 - [23] 刘静玲,盛连喜,侯瑞珍. 不同温度下铜绿微囊藻生产特性的初步研究[J]. 农业与技术, 1994 (2) : 21-24. (LIU Jingling, SHENG Lianxi, HOU Ruizhen. An initial research for the growth chamber of *Microcystis aeruginosa* under different temperature [J]. Agriculture & Technology, 1994(2) :21-24. (in Chinese))
 - [24] EPPLER W. Temperature and phytoplankton growth in the sea[J]. Fishery Bulletin, 1972, 70(4) :1063-1085.
 - [25] ASAEDA T, VAN BON T. Modelling the effects of *macrophytes* on algal blooming in eutrophic shallow lakes [J]. Ecological Modelling, 1997, 104(2) :261-287.
 - [26] ZHANG Zhi, LI Can, ZENG Xiaolan. et al. Application of QUAL2E model to Chongqing urban section of the Yangtze River[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(1) :1-3.
 - [27] 张玉超,钱新,钱瑜,等. 太湖日成层现象的监测与模拟研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30 (11) : 23-26. (ZHANG Yuchao, QIAN Xin, QIAN Yu, et al. Field measurement and model simulation of diurnal stratification in Taihu Lake [J]. Environmental Pollution and Control, 2008, 30(11) :23-26. (in Chinese))
- (收稿日期:2015-04-23 编辑:徐 娟)
- +++++
- (上接第 58 页)
- [8] 夏军,朱一中. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17 (3) :262-269. (XIA Jun, ZHU Yizhong. The measurement of water resources security: a study and challenge on water resources carrying capacity [J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3) :262-269. (in Chinese))
 - [9] 朱一中,夏军,谈戈. 西北地区水资源承载力分析预测与评价[J]. 资源科学, 2003, 25 (4) :43-48. (ZHU Yizhong, XIA Jun, TAN Ge. Measurement and evaluation of water resources carrying capacity of Northwest China [J]. Resources Science, 2003, 25 (4) :43-48. (in Chinese))
 - [10] 左其亭,张云,林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究[J]. 水利学报, 2008, 39(4) :440-447. (ZUO Qiting, ZHANG Yun, LIN Ping. Index system and quantification method for human-water harmony [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4) :440-447. (in Chinese))
 - [11] 郭金玉,张忠彬,孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5) :148-153. (GUO Jinyu, ZHANG Zhongbin, SUN Qingyu. Study and applications of analytic hierarchy process [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(5) :148-153. (in Chinese))
- (收稿日期:2015-05-15 编辑:徐 娟)