

# 基于模糊矩阵法的河流健康评价体系

高宇婷, 高甲荣, 顾 岚, 张 雪, 钱斌天, 王 越

(北京林业大学 水土保持和荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:**基于河流健康评估, 针对威胁河流生态健康及河流治理的问题, 提供关于河流健康及其问题河段的科学解释与依据。在综合国内外河流健康状况评价方法及各项表征指标的基础上, 建立了基于模糊矩阵法的河流健康评价体系。应用模糊关系合成原理, 从多个因素对河流隶属等级状况进行综合评判。具体评价时分为目标层、准则层和指标层, 结合模糊矩阵采用层层推进的计算方法, 最后将计算结果分为自然、近自然、退化、人工 4 大类。结果表明: 怀沙河总体得分为 2.6 分, 其中自然状态占整条河段的 41%, 近自然状态占整条河段的 32%, 退化自然状态占整条河段的 27%。分段评价结果表明: 三岔、渤海、口头河段状态较好, 四渡河、南冶、辛营需要采用合理措施来改善河流生态系统。该评价方法可以针对性地提出改进措施和建议, 为城市郊区河流的健康和生态环境建设的可持续性提供思路。

**关键词:**模糊矩阵; 隶属度; 河流健康

中图分类号: P342.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)04-0196-04

## An Introduction to River Health Assessment Based on Fuzzy Matrix

GAO Yu-ting, GAO Jia-rong, GU Lan, ZHANG Xue, QIAN Bin-tian, WANG Yue

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating  
of the Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on river health assessment, focusing on several urgent issues of river ecological health and river improvement, offering scientific explanations and proofs on river health and weak reaches of it, this research summed up assessment methods and various indices at home and abroad, striking up fuzzy matrix assessment to measure the river health, which was in view of fuzzy relation combining principle, to comprehensively judge the condition of the river membership hierarchy in various factors. There were target layer, criterion layer and index layer specially in this assessment, which was adopted fuzzy matrix to calculate statics layer upon layer. At last, it was divided into four broad headings named: natural, near natural, degenerate, artificial. The assessment result showed that the status of the Huaisha River was 2.6 (natural: 41%, near natural: 32%, degenerate: 27%). Subsection assessment results indicated that: Sancha Reach, Bohai Reach, Koutou Reach were in good condition, Siduhe Reach, Nanye Reach, Xinying Reach were needed to adopt reasonable measurements to improve river ecosystem. The assessment put forward the reasonable suggestions and improvement measures which can offer several ideas to the health in suburban river and the sustainability of the eco-environmental construction.

**Key words:** fuzzy matrix; cluster analysis; river health

河流健康评估是一种根据某些与河流价值相关的特定指标, 以自然状态河段为本底值, 对人为活动或自然条件突变所造成的受干扰河溪生态系统的结构和功能作整体健康评判的方法<sup>[1]</sup>, 为威胁河流生态健康的问题及河流治理提供科学的解释与依据<sup>[2]</sup>。河流健康评估作为一种评估河流生态系统完整性和

可持续性的管理工具, 有助于科学团体和公众之间的沟通, 唤起社会对人类强加于河流影响的关注, 对于流域可持续管理和河流生态修复具有重要意义。

河流健康评估有多种方法, 其中单一的数理统计法、专家打分综合分析法对河流的评价会略显单薄与主观, 模糊综合评判法是应用模糊关系合成的原理,

收稿日期: 2011-11-14

修回日期: 2011-12-26

资助项目: 国际科技合作项目 (2009DFA32490)

作者简介: 高宇婷 (1989—), 女, 山西省交口县人, 硕士生, 主要研究方向为河流生态恢复。E-mail: ws\_gyt123@163.com

通信作者: 高甲荣 (1963—), 男, 陕西省韩城县人, 教授, 主要研究方向为水土保持。E-mail: jiaronggao@sohu.com

从多个因素对被评判事物隶属等级状况进行综合评判的一种方法。在模糊综合评判中,指标的可综合性问题是在模糊综合评判过程中自然解决的,不需要专门的指标无量纲化处理。该方法适用性较强,既可用于主观指标的综合评判,又可用于客观指标的综合评判。由于在现实世界中亦此亦彼的模糊现象大量存在,所以模糊综合评判方法的应用非常广泛<sup>[3]</sup>,特别是在主观指标的综合评判中,模糊综合评判可以发挥模糊方法的独特作用,评价结果要优于其它方法。因此本文利用模糊综合评价法对怀沙河的河流生态健康进行综合评价。

1 评价指标体系建立

Schofield 认为河流健康是水生生态系统对于支持和保持关键生态过程和相似于本区域内无干扰的生物栖息地的多物种构成的、具有生物多样性和功能性组织的群落的能力<sup>[4]</sup>。文伏波等认为河流健康是指河流在人类开发利用和自身对干扰所具有抵抗力和恢复力的共同作用下,能保持合理的自然结构状态,实现正常的水、物质及能量的循环及健全的功能,包括良好的生态环境功能和社会经济功能,满足人类社会的可持续发展需求,最终形成人类对河流的开发

与保护平衡的良性循环<sup>[5]</sup>。综上所述,河流的自我修复功能在河流健康中处于重要位置,因此河流生态健康评价应重视对河流自我修复功能的评价。

董哲仁等提出将“可持续利用的生态健康河流”作为河流管理的目标和评估工具,认为河流健康评估的内容包括物理—化学评估、生物栖息地质量评估、水文评估和生物评估<sup>[6]</sup>。将上述评估内容侧重于河流自我修复功能来归类,河流健康评价总体概括为地貌(承载水体)、生态(流域生物)、水文(维持河流生态系统存在和平衡)三个准则层。这三个准则层相互依存、相互影响、相互辅助构成河流自我修复的有机体。而根据具体实施评价时使用的方法可将河流评价目标层定为定量评价和定性评价。

定性评价可以通过对特定状态下河流生态系统的描述,确定其所处的近自然状况,具有普遍性和通用性,适用于大范围的河流生态评价。目前国际上通用的评价体系指标如 RIVPACS, AUSRIVAS, ISC, IRC, AQEM 多采取定性评价的方式以满足不同地区的需要,实现不同评价体系结果的通用。定量评价可以对所测指标进行量化,其结果更具客观性。在评价方面可弥补定性指标主观上对河流评价造成的偏差。河流评价指标体系结构如表 1 所示。

表 1 河流评价指标体系结构

目标层 A				定量评价 A <sub>1</sub>								定性评价 A <sub>2</sub>										
准则层 B				地貌特征 B <sub>1-1</sub>		水文特征 B <sub>1-2</sub>				生态特征 B <sub>1-3</sub>		地貌特征 B <sub>2-1</sub>				水文特征 B <sub>2-2</sub>		生态特征 B <sub>2-3</sub>				
指标层 C				水深	河宽	岸坡坡度	人造水利工程措施个数	流速	酸碱度	总氮	磷酸盐	溶解氧	缓冲带植被宽	缓冲带结构完整性	平面形态	河床材料透水性	两岸土地利用方式	岸坡结构	清澈程度	流速多样性	气味	岸坡植被

2 模糊综合评价实例

模糊综合评价是通过查阅已有的河流评价研究方法<sup>[7]</sup>以及数学建模思想<sup>[8-9]</sup>等构建等级模糊子集<sup>[10-13]</sup>,把反映生态河岸带的模糊指标进行量化(即确定各指标的隶属度),然后利用模糊变换对各指标进行综合分析。

步骤 1:对准则层的各指标进行层次单排序,确定其权重并对其进行一致性检验。

步骤 2:利用准则层中所有层次单排序结果,计算准则层相对于目标层而言元素的重要性权值。

步骤 3:用模糊矩阵法来计算各样点的近自然隶属度值。

根据指标层的单排序和准则层的再排序,进行所有目标层指标的总排序(表 2)。

定性评价的水文特征中清澈程度所占的权重最大,是河流健康评价的重要影响因素(表 2)。将上述评价体系应用于怀沙河的健康评价,选取典型断面进行调查(典型断面需覆盖怀沙河流域)。在调查时选

取 13 个样点进行调查,用卷尺测量河宽、水深、缓冲带植被宽,用罗盘测量岸坡坡度,缓冲带结构完整性的测定是在典型断面河道两侧设置 1 个 5 m×5 m 的乔灌样方,然后在其对角线上设置 3 个 1 m×1 m 的草本样方,记录植物的种类、盖度等特征,随后与未受干扰的河段进行比较,得出其等级值。用北京中西仪器出品的 BD80 系列野外便携式试剂盒测溶解氧、氨氮、磷酸盐含量。定性指标则当场观测记录,借鉴相关研究成果以及国内外适用标准得出的河流近自然评价标准<sup>[12]</sup>进行评价。对比分析其他区域河流,建立怀沙河的健康评价标准,分为自然、近自然、退化自然、人工 4 级<sup>[14-15]</sup>。

怀沙河发源于怀柔区沙峪乡南、北苇滩,经三岔村进入长城后,与响水湖支流汇合后形成干流,流经沙峪,辛营,于城关乡凯村附近入怀柔水库。全长 28.7 km,流域面积 175.2 km<sup>2</sup>,其中平原 17.2 km<sup>2</sup>,沿河有多处泉水汇入,年均流量 4 765 万 m<sup>3</sup>,河道有较大的坡度,水流较急,风景秀美,景观宜人;受人为活动影响仍然较大,有各类养殖业,旅游业,水体受到一定的污染。

表 2 河流评价指标权重

目标层 A	准则层 B	权重 $B_w$	指标层 C	权重 $C_w$	二级权重	排序
定量评价 $A_1$	地貌特征 $B_{1-1}$	0.373593	水深	0.227780	0.085097	10
			河宽	0.071025	0.026534	19
			岸坡坡度	0.455559	0.170194	6
			人造水利工程措施个数	0.245637	0.091768	9
	水文特征 $B_{1-2}$	0.527056	流速	0.108674	0.0572774	12
			酸碱度	0.114788	0.0604996	11
			总氮氮	0.055647	0.0293292	18
			磷酸盐	0.344363	0.1814988	4
			溶解氧	0.376527	0.1984509	2
	生态特征 $B_{1-3}$	0.099351	缓冲带植被宽	0.5	0.049676	13
			缓冲带结构完整性	0.5	0.049676	13
定性评价 $A_2$	地貌特征 $B_{2-1}$	0.373593	平面形态	0.097456	0.036409	17
			河床材料透水性	0.261116601	0.097551	8
			两岸土地利用方式	0.119194664	0.04453	16
			岸坡结构	0.522233	0.195103	3
	水文特征 $B_{2-2}$	0.527056	清澈程度	0.586946	0.309354	1
			流速多样性	0.323776224	0.170648	5
			气味	0.089277	0.047054	15
	生态特征 $B_{2-3}$	0.099351	岸坡植被	1	0.099351	7

## 2.1 定量评价

根据实测值和标准值<sup>[15]</sup>,利用模糊模型计算整条河流各指标隶属于不同等级的隶属度值,将其与指标权重进行复合运算,确定模糊关系运算矩阵,求得各指标评价值:

怀沙河地貌特征指标( $B_{1-1}$ )定量评价向量为:

$$B_{1-1} = \begin{bmatrix} 0.22778 \\ 0.071025 \\ 0.455559 \\ 0.245637 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0.375 & 0.625 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.6923 & 0.3077 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ = [0.2876 \quad 0.256641 \quad 0 \quad 0.4559]$$

根据模糊数学最大隶属度原则,从计算结果可以看出,怀沙河地貌特征隶属于人工状态等级。

怀沙河水文特征指标( $B_{1-2}$ )定量评价向量为:

$$B_{1-2} = \begin{bmatrix} 0.10867 \\ 0.11479 \\ 0.05565 \\ 0.34436 \\ 0.37653 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 0 & 0.3335 & 0.6665 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6705 & 0.3295 \\ 0 & 0 & 0.4194 & 0.5806 \\ 0.8872 & 0.1129 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ = [0.4489 \quad 0.0787 \quad 0.2542 \quad 0.2183]$$

根据模糊数学最大隶属度原则,从计算结果可以看出,怀沙河水文特征隶属于自然状态等级。

怀沙河生态特征指标( $B_{1-3}$ )定量评价向量为:

$$B_{1-3} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.3846 & 0.6154 \\ 0 & 0 & 0.4231 & 0.5769 \end{bmatrix} \\ = [0 \quad 0 \quad 0.4039 \quad 0.5962]$$

根据模糊数学最大隶属度原则,从计算结果可以看出,怀沙河生态特征隶属于人工状态等级。

## 2.2 定性评价

根据评价标准现场对河流进行评价,将整条河总体评价结果与指标权重进行复合运算,确定模糊关系运算矩阵,求得各指标评价值,怀沙河地貌特征指标( $B_{2-1}$ )定性评价向量为:

$$B_{2-1} = \begin{bmatrix} 0.097456 \\ 0.261117 \\ 0.119195 \\ 0.522233 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 0 & 0.5885 & 0.4115 & 0 \\ 0 & 0.5923 & 0.4077 & 0 \\ 0 & 0.6846 & 0.3154 & 0 \\ 0 & 0.3769 & 0.6231 & 0 \\ 0.8872 & 0.1129 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ = [0 \quad 0.4904 \quad 0.5096 \quad 0]$$

根据模糊数学最大隶属度原则,从计算结果可以看出,怀沙河地貌特征隶属于退化自然等级。

怀沙河水文特征指标( $B_{2-2}$ )定性评价向量为:

$$B_{2-2} = \begin{bmatrix} 0.586946 \\ 0.323776 \\ 0.089277 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 0.0731 & 0.9269 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8846 & 0.1154 \\ 0 & 0.9808 & 0.0192 & 0 \end{bmatrix} \\ = [0.0429 \quad 0.6316 \quad 0.2881 \quad 0.0374]$$

根据模糊数学最大隶属度原则,从计算结果可以看出,怀沙河水文特征隶属于近自然等级。

怀沙河生态特征指标( $B_{2-3}$ )定性评价向量为:

$$B_{2-3} = [1] \times [0 \quad 0.5269 \quad 0.4731 \quad 0] \\ = [0 \quad 0.5269 \quad 0.4731 \quad 0]$$

根据模糊数学最大隶属度原则,从计算结果可以看出,怀沙河生态特征隶属于近自然等级。

通过计算分别可得定量和定性的地貌、生态、水文的指标层评价向量  $B$  集。

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0.2878 & 0.2566 & 0 & 0.4559 \\ 0.4489 & 0.0787 & 0.2542 & 0.2183 \\ 0 & 0 & 0.4039 & 0.5962 \end{bmatrix}$$

由此可以看出,怀沙河定量评价地貌、生态、水文 3 个指标层分别为人工状态(1)、自然状态(4)、人工状态(1)。

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.4904 & 0.5096 & 0 \\ 0.0429 & 0.6316 & 0.2881 & 0.0374 \\ 0 & 0.5269 & 0.4731 & 0 \end{bmatrix}$$

怀沙河定性评价地貌、生态、水文 3 个指标层分别为退化自然状态(2)、近自然状态(3)、近自然状态(3)。

将权重与各指标值加权运算(人工状态(1)、退化自然状态(2)、近自然状态(3)、自然状态(4)),可计算出怀沙河总体河流健康状况指数:

$$A = (0.373593 \times 1 + 0.527056 \times 4 + 0.099351 \times 1) \times 0.5 + (0.37353 \times 2 + 0.527056 \times 3 + 0.099351 \times 3) \times 0.5 = 2.60$$

由此可知,怀沙河整体处于近自然状态与自然状态之间,其中定量评价中的地貌、水文指标较差,需采取浅滩深潭、生态治污等措施进行修复,使其逐步恢复到健康状态。

2.3 怀沙河典型河道分段评价

根据河流评价指标体系,选取怀沙河典型河道,利用模糊模型进行河流健康综合评价,详见表 3。三岔、渤海、口头综合得分较高,属近自然状态。四渡河、南冶、辛营综合得分较低,在河流生态恢复中还需要进一步加强,接近退化自然状态。其余河段介于两者之间。

表 3 怀沙河典型河道分段评价评价价值

位置	定量评价			定性评价			综合评价
	地貌特征	生态特征	水文特征	地貌特征	生态特征	水文特征	
1(四渡河)	2	1.5	2	2	2	2	1.98
2(六渡河)	3	2	2	2	2	3	2.45
3(大明星度假村)	3	1	2.5	2	3	2	2.31
4(景峪)	3	1	2.5	2	2	2	2.26
5(渤海)	2	1.5	3	3	3	3	2.73
6(洞台)	2	2	2	3	4	4	2.81
7(南冶)	3	1.5	3	1	1	2	2.19
8(东四渡河)	3	1	2	3	2.5	3	2.61
9(三渡河)	3	2	2	3	3	3	2.69
10(口头)	3	1	3	2	3	3	2.71
11(怀柔水库)	3	1	3	2	3	2	2.45
12(三岔)	3	1	3	3	3	3	2.90
13(辛营)	2	1	2	2	1	2	1.90

影响分值高低的主要指标是水文特征指标,因此在河流生态恢复过程中要高度重视河流的水文特征值的变化。

通过建立的评价指标体系,运用层次分析法可以计算出各评价河样带的自然度,从而归属其所处的自然性等级。

3 结 论

(1) 本文在根据河流健康定义上确定以地貌、生态、水文为准则层的评价指标体系,对怀沙河进行了基于模糊矩阵的河流健康评价,该评价方法所得出的评价结果与实际相符合。

(2) 用模糊评价和层次分析相结合的方法对怀沙河进行了评价发现,该河流总体得分为 2.6 分,其中自然状态占整条河段的 41%,近自然状态占整条河段的 32%,退化自然状态占整条河段的 27%。

(3) 洞台和景峪两段为地下河,在调查时无法测得其各项指标,但水质由出水处推测为良好。

参考文献:

[1] 高阳,高甲荣,陈子珊,等.河溪近自然治理评价指标体系探讨以及应用[J].水土保持研究,2007,14(6):404-408.

[2] Simpson J, Norris R, Barmuta L, et al. AusRivAS-National River Health Program: User Manual Website version[M]. 1999.

[3] 金菊良,魏一鸣,丁晶.基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J].水利学报,2004(3):65-70.

[4] Norris R H, Thomas M C. What is the river health[J]. Freshwater Biol.,1999,41:197-209.

[5] 文伏波,韩其为,董哲仁,等.河流健康的定义与内涵[J].水科学进展,2007,18(1):140-150.

[6] 董哲仁,孙东亚,彭静.河流生态修复理论技术及其应用[J].水利水电技术,2009,40(1):4-9.

[7] Morgen R P C, Rickson R J. Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach[M]. London: E&FN Spon,1995:35-41.

[8] 刘承平.数学建模方法[M].北京:高等教育出版社,2002.

[9] Gregor S. An integrated geographic information system approach for modeling the sustainability of conifer habit in an alpine environment[J]. Geomorphology,1998,21(3/4):265-280.

[10] 姜启源.数学模型[M].北京:高等教育出版社,1993.

[11] 高甲荣.近自然治理:以景观生态学为基础的治理工程[J].北京林业大学学报,1999,21(1):78-82.

(下转第 211 页)

分析表明,活动积温和有效积温与年平均气温的相关性均达到极显著水平,表明温度升高对积温的影响十分明显。模拟出积温与年平均气温的回归模式,见表 6。

表 6 积温与年平均气温回归模式

温度	活动积温	有效积温
$\geq 0^{\circ}\text{C}$	$A_{a0}=1662.5+170.5T$	$A_{e0}=1666.9+170.2T_{\text{年}}$
$\geq 30^{\circ}\text{C}$	$A_{a3}=1604.7+164.7T$	$A_{e3}=1602.8+164.0T_{\text{年}}$
$\geq 50^{\circ}\text{C}$	$A_{a5}=1454.7+178.1T$	$A_{e5}=1448.7+176.7T_{\text{年}}$
$\geq 10^{\circ}\text{C}$	$A_{a10}=801.1+189.9T$	$A_{e10}=775.4+183.0T_{\text{年}}$

回归模式显示,年平均气温每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ,将使共和盆地各级界限温度期间活动积温增加  $165\sim 190^{\circ}\text{C}$ ,有效积温增加  $164\sim 183^{\circ}\text{C}$ 。

4 结 论

(1) 共和盆地稳定通过  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  初日在 3 月中旬后期,终日在 10 月下旬后期;稳定通过  $\geq 3^{\circ}\text{C}$  初日在 3 月下旬前期,终日在 10 月中旬后期;稳定通过  $\geq 5^{\circ}\text{C}$  初日在 4 月中旬后期,终日在 10 月中旬前期;稳定通过  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  初日在 5 月下旬后期,终日在 9 月中旬前期。

(2) 各界限温度初日均呈现出提前趋势,其气候倾向率分别为  $-0.9, -1.3, -2.3, -2.3\text{ d}/10\text{ a}$ ,表现出界限温度值越高,初日提前趋势越明显;终日均呈现出推迟趋势,其气候倾向率分别为  $2.1, 1.8, 1.5, 2.4\text{ d}/10\text{ a}$ ,其中  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  终日推迟趋势最为明显。

(3) 各界限温度期间的持续日数与年平均气温均呈正相关,相关系数均达到极显著水平。若年平均气温升高  $1^{\circ}\text{C}$ ,则各界限温度初日提前  $3\sim 6\text{ d}$ ,终日推迟  $3\sim 4\text{ d}$ ,各界限温度期间的持续日数延长  $6\sim 10\text{ d}$ 。

(4) 界限温度期间活动积温均表现为增加趋势,

$\geq 0^{\circ}\text{C}, \geq 3^{\circ}\text{C}, \geq 5^{\circ}\text{C}, \geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温的气候倾向率分别为  $76.9, 75.4, 82.3, 98.7^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,存在随界限温度增高气候倾向率增大的规律;有效积温同样表现为增多趋势,  $\geq 0^{\circ}\text{C}, \geq 3^{\circ}\text{C}, \geq 5^{\circ}\text{C}, \geq 10^{\circ}\text{C}$  有效积温的气候倾向率分别为  $76.9, 74.4, 80.5, 94.2^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。

(5) 活动积温和有效积温与年平均气温的相关性均达到极显著水平,年平均气温每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ,将使共和盆地各级界限温度期间活动积温增加  $165\sim 190^{\circ}\text{C}$ ,有效积温增加  $164\sim 183^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献:

[1] 冯秀藻,陶炳炎. 农业气象学原理[M]. 北京:气象出版社,1994.

[2] 徐善玲,黄不国,黄琼,等. 浅谈作物积温的稳定性及其预报的准确性[J]. 江西气象科技,2005,28(3):34-35.

[3] 樊晓春,郭江勇,杨小利. 西峰黄土高原冬季积温变化对作物发育期的影响[J]. 中国农业气象,2007,28(3):318-321.

[4] 杨洪宾,徐成忠,李春光,等. 播期对冬小麦生长及所需积温的影响[J]. 中国农业气象,2009,30(2):201-203.

[5] 闫小珍,张随贤,苗国柱,等. 小麦发育期对冬季积温变化的响应分析[J]. 气象与环境科学,2009,32(4):37-39.

[6] 肖静,李楠,姜会飞. 作物发育期积温计算方法及其稳定性[J]. 气象研究与应用,2010,31(2):64-67.

[7] 冯明. 湖北省主要作物生育期间热量资源变化的研究[J]. 南京气象学院学报,1997,20(3):387-391.

[8] 赵俊芳,郭建平,马玉平. 气候变化背景下我国农业热量资源的变化趋势及适应对策[J]. 应用生态学报,2010,21(11):2922-2930.

[9] 桑建人,刘玉兰,韩世涛,等. 宁夏热量资源气候变化的 EOF 特征[J]. 气象科技,2007,35(2):187-190.

[10] 毛恒青,万晖. 华北、东北地区积温的变化[J]. 中国农业气象,2000,21(3):1-5.

[11] 刘勤,严昌荣,何文清. 黄河流域近 40a 积温动态变化研究[J]. 自然资源学报,2009,24(1):147-153.

(上接第 199 页)

[12] 高阳,高甲荣,李付杰. 基于河道—湿地—缓冲带复合指标的京郊河溪生态评价体系[J]. 生态学报,2008,28(10):5149-5160.

[13] 张凤玲,刘静玲,杨志峰. 城市河湖生态系统健康评价

[J]. 生态学报,2005,25(11):3019-3024.

[14] 陈子珊,高甲荣. 北京郊区河岸带自然性评价与生态恢复[D]. 北京:北京林业大学,2008.

[15] 冯泽深,高甲荣. 北京郊区雁栖河自然性定量评价[J]. 中国农村水利水电,2008(10):14-17.