

南京市江宁区牛首山河水生态监测与安全评估研究

黄昌硕¹, 盖永伟², 吴京¹

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省水资源服务中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 针对城市河流水体污染严重、水生态系统破坏加剧等突出问题,以南京市江宁区牛首山河为例,通过监测水质、浮游植物、底栖动物、重金属等指标的变化情况,选取了11项指标作为水生态安全评估的指标,为了减少主观因素对于指标权重确定的影响,采用基于熵值法-物元可拓评估模型进行牛首山河水生态安全状况评估。结果表明:牛首山河水质状况中等,藻类密度远超标准限值,生物多样性较差,其水生态安全状况综合评估等级在IV~V级之间,与牛首山河实际情况相吻合,研究成果对江宁区河流水生态修复与保护具有一定的指导作用。

关键词: 河流水生态监测; 水生态安全评估; 城市河流; 牛首山河; 南京市江宁区

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2019)05-0014-07

Water ecological monitoring and safety assessment of Niushoushan River in Jiangning District of Nanjing City

HUANG Changshuo¹, GAI Yongwei², WU Jing¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Jiangsu Water Resources Service Center, Nanjing 210029, China)

Abstract: In view of the severe problems of serious pollution of urban river waters and intensified damage of water ecosystems, the Niushoushan River in Jiangning District of Nanjing City was taken as an example, 11 water ecological evaluating indicators were selected by monitoring the changes of water quality, phytoplankton, benthic animals and heavy metals. In order to reduce the influence of subjective factors on the determination of index weights, the entropy method-material element extension evaluation model was used to evaluate the water ecological security status of the Niushoushan River. The results showed that the water quality of Niushoushan River is moderate, the algae density far exceeds the standard limit, and the biodiversity is poor. The comprehensive assessment level of water ecological security status is between IV and V, which is consistent with the actual situation. This study helps guiding the water ecological restoration and protection in Jiangning District.

Key words: river water ecology monitoring; safety assessment of river water ecology; urban river; Niushoushan River; Jiangning District of Nanjing City

1 研究背景

目前,国内现有的相关标准、规范和导则中,涉及到水生态监测与安全评估的内容远不能满足生态文明城市建设的需求,相关指标应用并未广泛普及,尚未建立常规性的动态监测体系^[1]。

近年来,南京市江宁区河流生态状况受经济社

会高速发展的影响,个别时段部分河段水质状况较差,不能满足群众对美好生态环境的需求。因此,开展河流水生态监测与安全评估研究,有助于摸清河流水生态系统状况,为生态系统保护与科学恢复提供基础支撑,也有助于提高周边群众的生活满意度。

本次研究以南京市江宁区牛首山河为例,对河流水生态状况进行监测和安全评估,为促进河流生

收稿日期:2019-02-28; 修回日期:2019-05-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0406505)

作者简介:黄昌硕(1980-),女,江苏南京人,博士,高级工程师,研究方向为水资源规划与管理方面。

通讯作者:盖永伟(1987-),男,山东莱阳人,博士,工程师,研究方向为水资源规划与管理。

态系统的整体恢复提供技术支撑。

2 研究区概况

江宁区位于南京市南部,长江下游南岸,区域总面积 1 558 km²,水域面积 186 km²(不含长江),处秦淮河流域中游、邻近长江,过境水资源丰富,降水充沛。牛首山河系外秦淮河支流,西起洋山、东至外秦淮河干河,属太湖流域。河道由人工纳污渠(沿隐龙路及沿康平街)、硬化岸堤河道段、自然岸堤河道段等组成,全长约 8.0 km,流域面积约 46.4 km²,沿河设有何魏泵站、长山泵站、江南青年城处理站、水阁路桥等污水提升或处理设施。牛首山河作为江宁城区的主要支流之一,是城市生态系统的重要组成部分,近年来受到人类活动的剧烈干扰,其水质逐步出现恶化状态,河流生态系统受到严重破坏。这几年,通过实施截污治污、生态修复等一系列工程措施,其生态环境状况已有明显好转,但依旧不能满足周边群众对生态环境日益增长的高需求。牛首山河具体位置见图 1。

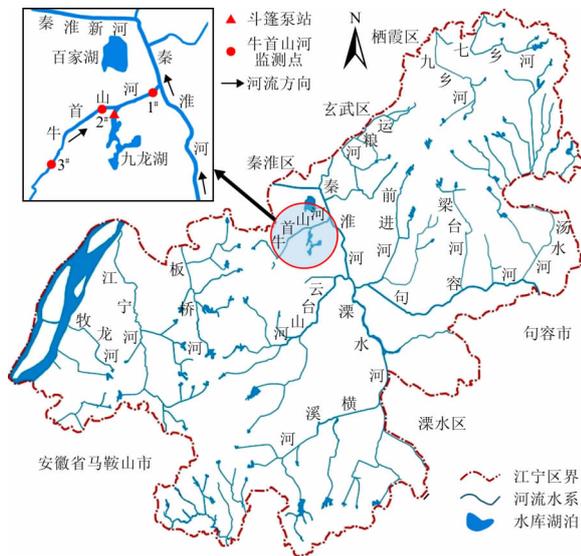


图1 南京市江宁区水系及牛首山河位置和监测点布置图

3 研究方法

本次研究通过在牛首山河上布设监测站点和现场采样调查等手段^[2],构建牛首山河水生态安全评估指标体系,选择基于熵值法-物元可拓模型综合评估其水生态安全状况^[3],为牛首山河生态治理与修复提供科学依据。

3.1 水生态监测点布设方案

根据牛首山河的河流长度、形态特征、水文条件

和评估需要,设置 3 个河岸带现场调查点与水质监测点,牛首山河 1 监测点处于河流下游,牛首山河 3 监测点处于河流上游。调查时间为 2016 年 8 月和 2016 年 11 月,分两次对牛首山河开展了浮游植物和底栖动物现场监测与调查。水质监测选择的两个季节为夏季和秋季,是浮游植物生长的盛期,也是水质的敏感时期,能较好地反映河流生态系统的健康状况^[4-6]。现场河岸带调查于 2016 年 8 月进行,表 1 给出了牛首山河的 3 个监测点位坐标,监测点位置如图 1 所示。

表1 牛首山河水生态监测点经纬度

测点编号	经度/(°)	纬度/(°)
1#	118.826813	31.926850
2#	118.797980	31.917858
3#	118.778354	31.898752

3.2 水生态安全评估指标与评估指标

3.2.1 评估指标的选取 牛首山河附近很多小区并未建立完善的污水处理设施,生活污水直接排入九龙湖,然后经过泵站进入河道。因此,在充分考虑到牛首山河自身资料条件和监测采样难度及成本,同时结合实际情况,依据科学性、完整性、实用性、可评价性的原则,牛首山河水生态安全评估指标选取了水质(RC_1)、藻类密度(RC_2)、大型底栖动物生物多样性指数(RC_3)、重金属污染状况(RC_4)、天然湿地保留率(RC_5)、河流形态结构(RC_6)、水资源开发利用指数(RC_7)、最低生态水位满足程度(RC_8)、河流连通阻隔状况(RC_9)、水功能区水质达标率(RC_{10})、防洪达标率(RC_{11})等 11 个指标^[7],详见表 2。牛首山河现场采样调查主要监测指标包括水质、浮游植物、底栖动物、重金属等指标,其中水质监测数据见表 3,夏季和秋季浮游植物优势种见表 4,夏季和秋季各监测点浮游植物多样性指数见表 5,夏季和秋季底栖动物各物种密度和生物量见表 6,夏季和秋季各监测点底栖动物多样性见表 7,夏季和秋季各监测点沉积物重金属含量均值见表 8。其余指标主要根据《江苏省水资源公报》《江苏省统计年鉴》和江宁区水务局提供的水位流量数据等计算得到。

3.2.2 评估标准的确定 本文研究的河流水生态安全状况评估等级划分为非常安全(I级)、较安全(II级)、基本安全(III级)、不安全(IV级)、极不安全(V级)5个等级^[9],其中各等级的临界值都采用目前已有的规范、标准和研究成果中的指标临界值,

表2 牛首山河安全评估指标 - 监测指标

安全评估指标	监测指标	备注 ^[8]
水质 RC_1	《地表水环境质量标准》常规指标, 选取了 DO、 COD_{Mn} 、COD、 BOD_5 、 NH_3-N	8、11月各1次
藻类密度 RC_2	藻类种数和密度*	8、11月各1次
大型底栖动物生物多样性指数 RC_3	底栖动物生物量和种类组成	8、11月各1次
重金属污染状况 RC_4	砷、汞、镉、铬、铅密度	8、11月各1次
天然湿地保留率 RC_5	现状保持水力学联系没有改变生境类型的天然湿地面积比例	初夏调查1次
河流形态结构 RC_6	蜿蜒度、渠化度、河岸带状况	初夏调查一次
水资源开发利用指数 RC_7	河道取用水量、流域水资源总量	逐月的数据
最低生态水位满足程度 RC_8	长系列/整年的水位数据	逐月的数据
河流连通阻隔状况 RC_9	河段闸坝阻隔特征	
水功能区水质达标率 RC_{10}	水功能区个数、水质状况	每月1次
防洪达标率 RC_{11}	满足预期防洪标准的比例	调查指标

注:表中“*”表示数值为优势度。

表3 牛首山河水质监测数据 mg/L

测点	月份	DO	COD_{Mn}	COD	BOD_5	NH_3-N
1#	8	4.4	6.3	25.8	4.0	0.06
	11	5.9	7.4	30.5	5.6	3.95
2#	8	6.0	7.8	25.9	4.2	2.72
	11	7.6	5.4	20.3	3.0	0.85
3#	8	8.0	6.5	24.4	4.0	0.06
	11	7.8	5.8	32.1	3.6	2.30

如水质监测指标临界值选用地表水环境质量标准(GB 3838-2002)中的基本指标标准限值,河流连通阻隔状况、天然湿地保留率、大型底栖动物生物多样性、重金属污染状况、水资源开发利用等5个指标参考《河流健康评估指标、标准与方法(试点工作用)》(办资源[2010]484号)中指标的临界值,最低生态水位保障程度、水功能区水质达标率、防洪指标等3个指标参考江苏省水利厅发布的《江苏省主要河流健康状况报告》中指标的临界值,河流形态结构、藻类密度等2个指标参考国内外水生态安全评

估指标相关研究成果以及专家建议等确定评定等级临界点^[10-12]。表9给出了河流水生态安全状况总体评估标准分级。

表4 牛首山河夏季和秋季浮游植物优势种

门	属	学名	夏季	秋季
	微囊藻	Microcystis	0.335	
	鱼腥藻	Anabaena	0.120	
	螺旋藻	Spirulina	0.084	
蓝藻门	平裂藻	Merismopedia	0.048	
	束丝藻	Aphanizomenon		0.082
	席藻	Phormidium		0.155
	颤藻	Oscillatoria	0.134	0.033
绿藻门	纤维藻	Ankistrodesmus		0.023
	四尾栅列藻	Scenedesmus quadricauda		0.036
硅藻门	颗粒直链藻	Melosira granulate		0.157
隐藻门	蓝隐藻	Chroomonas		0.023
	隐藻	Cryptomonas		0.104

注:表中数值为优势度。

表5 牛首山河夏季和秋季各监测点浮游植物多样性指数

多样性指数	夏季				秋季			
	1#	2#	3#	均值	1#	2#	3#	均值
Shannon - Wiener 指数	1.23	1.52	2.18	1.64	1.10	1.63	1.70	1.47
Simpson 指数	0.54	0.73	0.82	0.70	0.53	0.73	0.78	0.68
Margalef 指数	1.38	1.14	1.64	1.39	0.70	0.57	0.49	0.59
Pielou 指数	0.37	0.48	0.64	0.50	0.46	0.74	0.82	0.67

表 6 牛首山河夏季和秋季底栖动物各物种密度和生物量

纲	中文名	夏季		秋季	
		密度/(ind · m ⁻²)	生物量/(g · m ⁻²)	密度/(ind · m ⁻²)	生物量/(g · m ⁻²)
寡毛纲	苏氏尾鳃蚓	13.3	0.0769		
	霍甫水丝蚓	13.3	0.0187	1.7	0.0018
	中华河蚓			1.1	0.0014
	黄色羽摇蚊	0.6	0.0012		
	浅白雕翅摇蚊	4.4	0.0142		
	梯形多足摇蚊			1.2	0.0011
	长跗摇蚊属			0.6	0.0006
	伟蜓属			1.8	0.9580
	红小蜻属			3.1	0.7527
	尾鳃属			9.9	0.1163
昆虫纲	负子蝻			0.6	0.1596
	划蝻			1.9	0.0023
	四节蜉属			0.6	0.0019
	日本沼虾	48.9	4.7344	7.8	0.8624
	中华锯齿米虾			11.2	0.5339
	铜锈环棱螺	63.7	89.9844	4.1	11.7015
	长角涵螺	1.1	0.2664		
	腹足纲	0.7	0.1145		
	纹沼螺				
	尖口圆扁螺			0.6	0.0243
尖膀胱螺			1.9	0.1969	

表 7 牛首山河夏季和秋季各监测点底栖动物多样性

多样性指数	夏季				秋季			
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	均值	1 [#]	2 [#]	3 [#]	均值
Shannon - Wiener 指数	0.08	0.81	1.09	0.66	1.68	0.83	1.90	1.47
Simpson 指数	0.03	0.44	0.59	0.35	0.79	0.50	0.79	0.69
Margalef 指数	0.20	0.72	0.55	0.49	1.85	0.58	2.40	1.61
Pielou 指数	0.11	0.58	0.79	0.49	0.94	0.76	0.76	0.82

表 8 牛首山河夏季和秋季各监测点沉积物重金属含量均值

mg/kg

重金属	夏季均值	秋季均值	临界效应值(TEL)	必然效应值(PEL)
砷(As)	15.7 ± 2.7	15.2 ± 2.4	5.90	17.00
汞(Hg)	0.157 ± 0.063	0.150 ± 0.062	0.17	0.49
铬(Cr)	60.0 ± 12.5	54.7 ± 14.4	37.00	90.00
镉(Cd)	0.31 ± 0.06	0.28 ± 0.08	0.60	3.50
铅(Pb)	32.0 ± 3.7	29.1 ± 4.0	35.00	91.00

3.3 水生态安全评估方法

目前,国内外学者在水生态安全评估工作中大量应用了灰色聚类法、模糊综合评估法、人工神经网络法、模糊物元分析法等,在众多评估方法中,由于物元可拓模型是直接面向问题而不是面向数据或空间形式的处理方法,因此本文选取能够更好地反映水体实际情况的物元可拓模型方法对河流水生态安全状况进行评估,同时针对物元可拓模型中存在的指标权重确定不太理想这一问题,采用熵值法对其进行改进^[13-16]。

熵值法是一种客观赋权法,在信息论中,熵值反映了信息无序化的程度,熵越大,有序程度就越低,不确定性越大;反之,熵越小,其有序程度越高,不确定性越小。熵值法计算步骤包括数据标准、计算参

评对象指标值的比重、计算指标信息熵值和信息效用值、计算指标权重。熵值法确定指标权重的本质主要是利用了指标信息的价值系数来计算,其价值系数越高,权重就越大,对评估结果的贡献程度就越大。在指标权重确定的过程中不需要加入任何人为主观信息,极大程度上削弱了极端值对综合评估的影响。

物元可拓模型通过评估级别和实测数据,得到模型的经典域、节域及关联度,从而建立定量综合评估模型。物元可拓评估的具体计算步骤包括确定经典域、确定节域、确定关联函数、计算待评估物元同评估等级间的综合关联度、评定等级、计算物元隶属程度等。熵值法和物元可拓模型的具体原理和计算过程本文不再赘述。

表9 江宁区河流水生态安全综合评估等级划分

综合指数	安全等级	安全状态	江宁区河流水生态系统表征
10	V	极不安全	水生态功能几近崩溃。河流水生态系统结构被严重破坏,各项功能丧失,难以恢复,水生态问题频发。
30	IV	不安全	水生态功能严重退化。河流水生态系统结构被破坏,各项功能逐渐失效,且较难恢复,水生态问题较严重。
50	III	基本安全	水生态功能稍有退化。河流水生态系统结构发生变化,但尚能正常运转,但受干扰后易恶化,水生态问题开始显现。
70	II	较安全	水生态功能基本完整,受到轻微破坏。河流水生态系统结构较为完整,一般干扰下能恢复,水生态问题基本不出现。
90	I	非常安全	水生态功能较为完善,基本未收到破坏。河流水生态系统结构完整,再生能力强,无水生态问题情况发生。

本次研究选择的熵值法-物元可拓综合评价模型可以处理各评价等级间的过渡问题,并且很好地降低了人为对权重的干扰程度,能够有效地反映出河流水生态安全状况。

4 河流水生态安全综合评估

4.1 构建经典域和节域

由于所选择的指标中既有正向指标(越大越优),又有逆向指标(越小越优),且量纲和尺度不同,因此,需要对指标数据进行标准化,处理后每个指标的取值范围为 $[0,1]$,将正、逆向指标均化为正向指标,最优值为1,最劣值为0,得到牛首山河水生态安全评估指标规范值。牛首山河水生态安全评估指标值及标准化值见表10。

表10 牛首山河水生态安全评估指标值及标准化值

指标	类型	指标值	标准化值
水质 RC_1	递增	2.758	0.552
藻类密度 $RC_2/10^4 L^{-1}$	递减	9592	0
大型底栖动物生物多样性 RC_3	递增	1.065	0.355
重金属污染状况 RC_4	递增	3.468	0.694
天然湿地保留率 RC_5	递增	4.25	0.850
河流形态结构 $RC_6/\%$	递增	80	0.762
水资源开发利用率 $RC_7/\%$	递减	20.6	0.485
最低生态水位保障程度 RC_8	递增	4.9	0.980
河流连通阻隔状况 RC_9	递增	2.1	0.420
水功能区水质达标率 $RC_{10}/\%$	递增	55	0.357
防洪达标率 $RC_{11}/\%$	递增	95	0.900

构建物元可拓评估模型的经典域矩阵 R_{0j} :

$$R_{0j} = \begin{bmatrix} & N1 & N2 & N3 & N4 & N5 \\ RC_1 & < 4 \sim 5 > & < 3 \sim 4 > & < 2 \sim 3 > & < 1 \sim 2 > & < 0 \sim 1 > \\ RC_2 & < 0 \sim 30 > & < 40 \sim 150 > & < 150 \sim 350 > & < 350 \sim 1000 > & < 1000 \sim 2500 > \\ RC_3 & < 2.5 \sim 3 > & < 2 \sim 2.5 > & < 1 \sim 2 > & < 0.1 \sim 1 > & < 0 \sim 0.5 > \\ RC_4 & < 4 \sim 5 > & < 3 \sim 4 > & < 2 \sim 3 > & < 1 \sim 2 > & < 0 \sim 1 > \\ RC_5 & < 93 \sim 100 > & < 86 \sim 93 > & < 72 \sim 86 > & < 44 \sim 72 > & < 16 \sim 44 > \\ RC_6 & < 4 \sim 5 > & < 3 \sim 4 > & < 2 \sim 3 > & < 1 \sim 2 > & < 0 \sim 1 > \\ RC_7 & < 0 \sim 8 > & < 8 \sim 22 > & < 22 \sim 28 > & < 28 \sim 32 > & < 32 \sim 40 > \\ RC_8 & < 4 \sim 5 > & < 3 \sim 4 > & < 2 \sim 3 > & < 1 \sim 2 > & < 0 \sim 1 > \\ RC_9 & < 4 \sim 5 > & < 3 \sim 4 > & < 2 \sim 3 > & < 1 \sim 2 > & < 0 \sim 1 > \\ RC_{10} & < 90 \sim 100 > & < 70 \sim 90 > & < 50 \sim 70 > & < 40 \sim 50 > & < 30 \sim 40 > \\ RC_{11} & < 95 \sim 100 > & < 90 \sim 95 > & < 85 \sim 90 > & < 70 \sim 85 > & < 50 \sim 70 > \end{bmatrix}$$

构造值域 :

$$R_p = \begin{bmatrix} RC_1 & < 0 \sim 5 > \\ RC_2 & < 0 \sim 2503 > \\ RC_3 & < 0 \sim 3 > \\ RC_4 & < 0 \sim 5 > \\ RC_5 & < 16 \sim 100 > \\ RC_6 & < 0 \sim 5 > \\ RC_7 & < 0 \sim 40 > \\ RC_8 & < 0 \sim 5 > \\ RC_9 & < 0 \sim 5 > \\ RC_{10} & < 30 \sim 100 > \\ RC_{11} & < 50 \sim 100 > \end{bmatrix}$$

4.2 确定权重系数

依据上文介绍的熵值法计算各个指标权重系数, $\omega_j = (0.0341, 0.3208, 0.2766, 0.0039, 0.0051, 0.0712, 0.0277, 0.1584, 0.0225, 0.0733, 0.0063)$ 。

4.3 确定关联函数

结合熵值法计算得到的各指标权重,利用可拓距和位置的定义,在将各个评估指标值和各分级标准全部规范化的基础上,计算牛首山河水生态安全评估指标关于评估等级的关联函数,按照最大值原则确定牛首山河水生态安全状况的评估结果,评估结果见表 11。

4.4 评定等级

归一化结果为: $\bar{K}_j(p)^* = (0, 0.1182, 0.1939, 0.014, 1)$,可得级别特征值 $j^* = 4.430$,说明牛首山河水生态安全状况评估等级在 IV ~ V 级之间。牛首山河水生态安全评估 11 个指标中,仅有 RC_6 、 RC_8 属于水生态安全状况最好的 I 类,属于非常安全状态; RC_4 、 RC_7 、 RC_{11} 为 II 类,属于较安全状态;仅 RC_2 指标为最差的 V 类,属于极不安全状态;剩余的 RC_1 、 RC_3 、 RC_5 、 RC_9 、 RC_{10} 指标都属于 III 类,属于基本安全状态。

表 11 牛首山河水生态安全评估指标关于不同等级的关联度及评估结果

评估指标	I	II	III	IV	V	等级
RC_1	-0.3565	-0.0974	0.0877	-0.2527	-0.4395	III 级
RC_2	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	1.0000	V 级
RC_3	-0.5740	-0.4675	0.0610	-0.0575	-0.3466	III 级
RC_4	-0.2578	0.1349	-0.1848	-0.4893	-0.6170	II 级
RC_5	-0.3939	-0.2222	0.0938	-0.2857	-0.6429	III 级
RC_6	0.0588	-0.1429	-0.6250	-0.7500	-0.8125	I 级
RC_7	-0.4599	0.0722	-0.0673	-0.2761	-0.3701	II 级
RC_8	0.0204	-0.1800	-0.9500	-0.9667	-0.9750	I 级
RC_9	-0.6129	-0.3000	0.0476	-0.0455	-0.3438	III 级
RC_{10}	-1.0000	-0.375	0.2000	-0.1667	-0.3750	III 级
RC_{11}	-0.0227	0.0227	-0.4000	-0.6000	-0.8000	II 级

5 结 论

(1) 本文通过布设监测站点对南京市江宁区牛首山河水生态状况进行监测, 监测数据显示, 该河水质状况中等, 藻类密度远超标准限值, 生物多样性较差, 存在一定的水生态安全风险隐患; 根据淡水沉积物质量基准, 牛首山河表层沉积物重金属生态毒性风险较低。同时, 采用基于熵值法-物元可拓评估模型对江宁区牛首山河水生态安全状况进行综合评估, 评估结果显示牛首山河水生态安全状况评估等级在IV~V级之间, 且更偏重IV级, 水生态安全状况较差。

(2) 本文在河流生态状况监测的基础上, 选取了11项评估指标, 对河流生态安全状况进行评估, 评估结果能够较好地反映出一条河流的生态安全状况。未来, 不同区域可根据自身河流水系特点及经济发展状况, 选择不同的评估指标, 对河流生态安全状况进行综合评估, 可为河流生态系统保护和治理提供基础支撑。

参考文献:

[1] 陈水松, 唐剑锋. 水生态监测方法介绍及研究进展评述[J]. 人民长江, 2013, 44(S2): 92-96.

[2] 中华人民共和国水利部. 水环境监测规范: SL 219-2013 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

[3] 董哲仁. 生态水工学的理论框架[J]. 水利学报, 2003(1): 1-6.

[4] GRATHWOHL P, RÜGNER H, WÖHLING T, et al. Catchments as reactors: a comprehensive approach for water fluxes and solute turnover[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(2): 317-333.

(上接第13页)

[16] SU Junwei, CHAI Guoliang, WANG Le, et al. Pore-scale direct numerical simulation of particle transport in porous media[J]. Chemical Engineering Science, 2019, 199: 613-627.

[17] SU Junwei, CHAI Guoliang, WANG Le, et al. Direct numerical simulation of pore scale particle-water-oil transport in porous media[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 180: 159-175.

[18] SONG Wen, KOVSCEK A R. Direct visualization of pore-scale fines migration and formation damage during low-salinity waterflooding[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 34: 1276-1283.

[5] PARR T W, SIER A R J, BATTARBEE R W, et al. Detecting environmental change: science and society - perspectives on long-term research and monitoring in the 21st century[J]. Science of the Total Environment, 2003, 310(1-3): 1-8.

[6] GONG W, SHEN J. The response of salt intrusion to changes in river discharge and tidal mixing during the dry season in the Modaomen Estuary, China [J]. Continental Shelf Research. 2011, 31(7-8): 769-788.

[7] 余振荣. 河流生态系统及其监测指标体系[J]. 黑龙江环境通报, 2015, 39(4): 30-31.

[8] 罗文泊, 盛连喜. 生态监测与评估[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.

[9] 黄昌硕, 耿雷华, 王立群, 等. 中国水资源及水生态安全评估[J]. 人民黄河, 2010, 32(3): 14-16.

[10] 中华人民共和国水利部. 水生态文明城市建设评价导则: SL/Z 738-2016 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.

[11] 赵磊, 刘永, 李玉照, 等. 湖泊生态系统稳态转换驱动因子判定方法研究进展[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(1): 1-9.

[12] 余振荣. 河流生态系统及其监测指标体系[J]. 环境生态, 2015, 39(4): 30-31.

[13] 耿雷华, 丰华丽, 赵志轩, 等. 河湖健康评估理论与实践[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.

[14] 赵彦伟, 杨志峰. 城市河流生态系统健康评估初探[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 349-355.

[15] 赵玉红, 从纯纯, 赵敏. 我国城市河湖水生态环境评估体系构建与实证分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 58-61.

[16] 张晓岚, 刘昌明, 门宝辉, 等. 漳卫南运河流域水生态安全指标体系构建及评估[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(6): 626-630.

[19] NOIRIEL C, STEEFEL C I, YANG Le, et al. Effects of pore-scale precipitation on permeability and flow[J]. Advances in Water Resources, 2016, 95: 125-137.

[20] SOULAIN C, TCHELEPI H A. Micro-continuum approach for pore-scale simulation of subsurface processes[J]. Transport in Porous Media, 2016, 113(3): 431-456.

[21] 李战华, 郑旭. 微纳尺度流动实验研究的问题与进展[J]. 实验流体力学, 2014, 28(3): 1-11.

[22] ISSA R I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting[J]. Journal of Computational Physics, 1986, 62: 40-65.