银川市阅海湖水环境容量评估

郭 琦[1], 尹 娟[1], 邱小琮[2], 李世龙[1], 雷兴碧[1]

(1.宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2.宁夏大学 生命科学学院, 宁夏 银川 750021)

摘 要: [目的] 探明银川市阅海湖水环境容量及其变化趋势, 为阅海湖水体污染防治及管理提供依据。[方法] 分别于 2015 至 2017 年冬(1 月)、春(4 月)、夏(7 月)、秋(10 月)对阅海湖进行水样采集, 设置 3 类水质目标情景, 采用已有模型评估阅海湖 2015 至 2017 年在不同水质目标情景下高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD_{cr})、五日生化需氧量(BOD_5)、总氮(TN)、氨氮(NH_3-N)、总磷(TP)的最大环境容量。[结果] 水质目标为Ⅱ类时, BOD_5, NH_3-N 有剩余环境容量, COD_{cr} 需消减 122.4%, 142.7%, 169.6%; COD_{Mn} 需消减 190.7%, 243.8%, 248.6%, TN 需消减 47.3%, 40.5%, 47.1%; TP 需消减 67.6%, 71.9%, 71.0%; 水质目标为Ⅲ类时, BOD_5, NH_3-N, TN 有剩余环境容量, COD_{cr} 需消减 0%, 4.4%, 40.3%; COD_{Mn} 需消减 7.3%, 85.7%, 94.1%; TP 需消减 35.0%, 42.6%, 41.8%; 水质目标为Ⅳ类时, 各项指标均达到水质标准且剩余环境容量呈减小趋势, 其中 TP 浓度接近Ⅳ类水质标准限值, 是阅海湖最主要污染因子。[结论] 2015 至 2017 年阅海湖水质总体为地表水Ⅳ类, 各项指标均有剩余环境容量, 水质呈逐年恶化趋势。

关键词: 阅海湖; 水环境容量; 水质目标; 模型评估

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2019)05-0290-05 **中图分类号**: X171.1

文献参数: 郭琦, 尹娟, 邱小琮, 等. 银川市阅海湖水环境容量评估[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 290-294. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.041; Guo Qi, Yin Juan, Qiu Xiaocong, et al. Water environmental capacity assessment of Yuehai Lake in Yinchuan City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 290-294.

Water Environmental Capacity Assessment of Yuehai Lake in Yinchuan City

Guo Qi[1], Yin Juan[1], Qiu Xiaocong[2], Li Shilong[1], Lei Xingbi[1]

(1. *School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*; 2. *School of Life Science, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

Abstract: [Objective] This study aimed at ascertaining the water environmental capacity and its changing trends to provide basis for prevention and control of water pollution in Yuehai Lake. [Methods] Water samples were collected in winter (January), spring (April), summer (July) and autumn (October) from 2015 to 2017, respectively. Three water quality control target (WQCT) scenarios were set, and existing models were used to evaluate the permanganate index (COD_{Mn}), chemical oxygen demand (COD_{Cr}), biological oxygen demand (BOD_5), total nitrogen (TN), ammonia nitrogen (NH_3-N), and total phosphorus (TP) of Yuehai Lake from 2015 to 2017. [Results] For WQCTs set at level Ⅱ, BOD_5 and NH_3-N have residual environmental capacity, COD_{Cr} needed to be reduced by 122.4%, 142.7%, and 169.6%, COD_{Mn} needed to be reduced by 190.7%, 243.8%, and 248.6%, TN needed to be reduced by 47.3%, 40.5%, and 47.1%, and TP needed to be reduced by 67.6%, 71.9%, and 71.0%. If the WQCTs were set at level Ⅲ, BOD_5, NH_3-N, and TN have residual environmental capacity, COD_{Cr} needed to be reduced by 0%, 4.4%, and 40.3%; COD_{Mn} needed to be reduced by 7.3%, 85.7%, and 94.1%; and TP needed to be reduced by 35.0%, 42.6%, and 41.8%. If the WQCTs were set at level Ⅳ, all the indicators meet the water quality standard. The surplus environmental capacity showed a trend of decrease over time. The concentration of TP, which was the chief pollutant in the

收稿日期: 2019-03-27 **修回日期**: 2019-05-14

资助项目: 宁夏高等学校一流学科建设(水利工程)资助项目"宁夏引黄灌区河湖湿地水环境承载力及其生态模型研究"(NXYLXK2017A03)。

第一作者: 郭琦(1992—), 男(汉族), 宁夏回族自治区中卫市人, 硕士研究生, 研究方向为水资源与水环境调控。E-mail: 787937200@qq.com。

通讯作者: 邱小琮(1971—), 男(汉族), 浙江省湖州市人, 教授, 主要从事水域生态学及水环境调控方面的教学与研究工作。E-mail: qxc7175@126.com。

Yuehai Lake, was currently at the level Ⅳ WQCT value. [Conclusion] The water quality of Yuehai Lake from 2015 to 2017 is currently classified as class Ⅳ surface water; certain indicators have a residual environmental capacity based on the WQCT scenarios, and there is a trend of water quality deterioration over time.

Keywords: Yuehai Lake; water environmental capacity; water quality standards; model assessment

水环境容量是某一水环境单元满足特定的功能所能容纳污染物的负荷[1-4]，是度量水体自净能力和治理规划水环境的重要依据[5-8]。Streeter 和 Phelos 1925 年首次建立 DO-BOD 一维水质模型后，经过多年的发展，水环境容量模型的建立及应用逐渐完善。目前湖库水质测算中箱式完全混合模型[9]的应用相对比较广泛，在此基础上，建立了沃伦威德(Vollenweider)水环境容量计算模型[10]和其他一些水环境容量计算模型，如狄龙(Dillion)模型[10-13]、OECD 模型和合田健模型[14]。国内许多学者对中国重要河流与湖泊的水环境容量进行了深入的研究[15-19]，为中国湖库水体污染防治奠定了坚实的基础。

阅海湖位于宁夏回族自治区银川市金凤区偏北部，是银川市面积最大的一块生态湿地，湖水面积 12.00 km^2，平均水深 1.80 m，具有生态改善、湿地保护等功能。阅海湖沿岸农业灌溉退水以及少量生活污水均排入该湖，改变了原有的水体环境。近年来开发利用导致湖沼总体水质逐年恶化，已成为影响区域可持续发展的主要环境问题之一。目前关于阅海湖水环境质量综合评价方面的研究有所开展[20-21]，但缺乏最新的环境容量研究，本研究于 2015 至 2017 年连续 3 a 对阅海湖水体季节性采样检测，并利用已有模型评估不同水质目标情景下水体环境容量，以期为阅海湖水体污染防治及管理提供依据。

1　材料与方法

1.1　样点设置与采样时间

通过分析阅海湖的地形特点共设置了 4 个采样点，分别位于点 S01(进水口)、点 S02(出水口)、点 S03(湖中心 1)和点 S04(湖中心 2)；采样时间为 2015 年至 2017 年的 1 月(冬季)、4 月(春季)、7 月(夏季)、10 月(秋季)，共采集水样 12 次。

1.2　水样采集与测定

使用采水器采集水样并保存，当天带回实验室测定。

根据白维东等[20]，李斌等[21]的研究结果，影响阅海湖水体的主要污染物指标为总氮、总磷和 COD，结合相似湖泊水环境研究过程中水质指标的选取情况，选取 COD_{Mn}，COD_{cr}，BOD_5 为有机污染物主要指标，TN，NH_3-N，TP 为富营养化主要指标，各指标采用方法及标准如表 1 所示：

表 1　水质指标检测方法及标准

指标	方法	标准
COD_{Mn}	酸性高猛酸钾法	GB 11892-92
COD_{cr}	重铬酸钾法	GB 11914-89
BOD_5	稀释接种法	GB/T7488-1987
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	GB 11894-89
NH_3-N	纳氏试剂分光光度法	GB 7479-87
TP	钼酸铵分光光度法	GB 11893-89

1.3　估算模型

1.3.1　COD，BOD_5 水环境容量估算模型　阅海湖是一个浅水湖泊，开阔的湖面在风浪的作用下，湖水的流动性较好，使得湖内水体的混合性良好，对湖体进行多年的监测，结果表明整个湖体进出水量基本平衡，水质处于相对稳定的状态，可以当作完全混合型湖泊进行研究。因此阅海湖的 COD_{cr}，COD_{Mn}，BOD_5 的水环境容量估算选用完全混合系统水质模型—沃伦威德(Vollenweider)分析计算，计算方法如式(1)所示，各参数含义如表 2 所示。

$$W=\frac{1}{\Delta t}(C_s-C_o)V+KC_sV+C_sq \tag{1}$$

表 2　沃伦威德(完全混合系统水质模型)模型参数及含义

符号	单位	参数含义
W	g/d	湖泊水体有机污染物的最高允许排放量
Δt	d	湖泊维持其设计水量的天数
C_s	mg/L	水质指标的目标控制浓度
C_0	mg/L	湖泊水体实测浓度
V	m^3	湖泊的设计水量
K	d^{-1}	湖泊中有机物的综合衰减系数
q	m^3/d	安全库容期间湖泊平均每天的流出水量

注：不考虑蒸发时，应等于入湖废水量、入湖地表径流量与上游河道来水量之和。

1.3.2　N，P 水环境容量估算模型　目前湖库水体中 N，P 环境容量估算模型较多，其中富营养化水体常用狄龙模型预测水质，库湾型水体和浅水湖泊常用合田健模型及世界经济合作与发展组织(OECD)模型预测水质[12]。以上 3 种模型都是确定型模型，均存在难以准确确定经验参数的缺陷，为全面了解阅海湖 N，P 的环境容量，本文参考相似湖泊的水环境容量研究，综合考虑后选用狄龙模型、世界经济合作与

发展组织(OECD)模型、合田健模型 3 种模型进行计算,最终评估结果为 3 种模型计算结果的均值,计算方法如下:

狄龙模型:

$$M_1 = A \cdot L_s = Q_{出} \cdot C_s/(1-R) \quad (2)$$

OECD 模型:

$$M_2 = A \cdot L_s = Q_{出} \cdot C_s \cdot [1+2.27 \cdot (V/Q_{出})^{0.586}] \quad (3)$$

合田健模型:

$$M_3 = Q_{出}\ C_s + 10A \cdot C_s \quad (4)$$

最终评估模型:

$$M = \sum_{1}^{3} M/3 \quad (5)$$

以上模型参数含义如表 3 所示。

表 3 狄龙模型、OECD 模型及合田健模型参数及含义

符号	单位	含义
M	t/a	水体氮或磷的纳污能力
L_S	g/(m² · a)	单位湖水面积对氮或磷的纳污能力
A	m²	计算时期湖水面积
$Q_{出}$	m³/a	稳态时湖泊的年出水量
R	—	氮、磷在湖体中的滞留系数

注:氮、磷的年出、入湖量(指通过各种途径带出湖体的量,包括水草打捞、捕鱼、下泄等带出的量)。

在无法得知年进、出湖的氮、磷量时,可按下式进行估计[22]:

$$R = 0.426\exp(-0.271Q_{出}/A) + 0.537\exp(-0.009\ 49Q_{出}/A)$$

1.3.3 计算参数确定 计算阅海湖水环境容量的参数取值见表 4。

表 4 阅海湖水环境容量计算参数取值

参 数	符号	单位	数值
枯水时段	Δt	d	30
湖泊容积	V	10^6 m³	21.6
水面面积	A	km²	12
平均水深	H	m	1.8
入库水量	$Q_{入}$	10^4 m³/d	7.1
出库水量	$Q_{出}$	10^4 m³/d	7.1
衰减系数	K	1/d	0.004
滞留系数(氮、磷)	R	—	0.933

K 值的确定方法有试验法、反推法和类比法,本文采用类比法确定,参考宁夏回族自治区星海湖的相关研究后,综合考虑 COD(BOD_5)的 K 值按保守的 0.004 d^{-1} 进行估计[23]。

水质指标目标控制浓度(C_s),根据 2015 至 2017 年阅海湖水体实际检测结果来看,其水质指标浓度介于地表水Ⅱ—Ⅳ类之间,为充分了解湖体在不同水质目标情景下的环境容量,共设置以下 3 种水质目标情景,情景一:达到Ⅱ类水质目标;情景二:达到饮用水源地最低水质目标要求,即达到Ⅲ类水质目标;情景三:达到Ⅳ类水质目标。

2 结果及分析

2.1 COD,BOD_5 水环境容量结果及分析

2015 年至 2017 年实测阅海湖 COD_{cr} 为 19.22,20.16,21.56 mg/L;COD_{Mn} 为 6.08,7.11 ,7.22 mg/L;BOD_5 为 2.65,2.00,2.83 mg/L。保持现状水体不再恶化,2015 至 2017 年阅海湖依靠自身降解及水流下泄可容纳 COD_{cr} 为 1 104.30,1 158.31,1 238.75 t/a;COD_{Mn} 为 349.33,408.51,414.83 t/a;BOD_5 为 152.26,162.60,114.91 t/a。根据沃伦威德模型,计算出 COD_{cr},COD_{Mn}、BOD_5 水环境容量结果见表 5。

(1) 情景一。达到Ⅱ类水质目标情况下,COD_{cr},COD_{Mn}环境容量连续 3 a 均为负值,现状水体中污染物负荷量远大于目标要求的环境容量,为达到水质标准,2015 至 2017 年应对 COD_{cr} 消减 122.4%,142.7%,169.6%;对 COD_{Mn}消减 190.7%,243.8%,248.6%,对 COD_{cr},COD_{Mn} 的消减量逐年上升,说明水体中 COD_{cr},COD_{Mn} 环境容量逐年减小,有机污染物排入总量增加,水质逐年恶化。BOD_5 现状水体污染物负荷量低于目标水质要求的环境容量,达到Ⅱ类水质标准且有剩余环境容量,剩余率为 37.7%,69.6%,21.6%,说明水体中 BOD_5 的水质良好,但水体中 BOD_5 剩余环境容量从 2015 年的 37.7%减小至 2017 年的 21.5%,水质呈现恶化趋势。

(2) 情景二。达到Ⅲ类水质目标情况下(BOD_5 的现状水体浓度优于水质标准,因此不设对比),2015 年 COD_{cr} 的环境容量略高于现状水体污染物负荷,有剩余环境容量,剩余率 18.5%,2016 年 COD_{cr} 的现状水体浓度超过Ⅲ类水质限值,下降为Ⅳ类水且环境容量逐年减小。为达到水质标准 2016 至 2017 年应当分别消减 COD_{cr} 为 4.4%、40.3%。COD_{Mn} 环境容量 3 a 内均低于现状水质污染物负荷,为达到水质标准需消减 COD_{Mn} 为 7.3%,85.7%,94.1%。

(3) 情景三。达到Ⅳ类水质目标情况下,COD_{cr},COD_{Mn} 的环境容量 3 a 内均高于现状水体污染物负荷量,有剩余环境容量, COD_{cr} 剩余率为 75.8%,73.1%,68.6%,COD_{Mn} 剩余率为 78.2%,69.4%,68.2%,COD_{cr},COD_{Mn} 剩余环境容量逐年减小,水质呈恶化趋势。

表 5　2015—2017 年不同水质目标下阅海湖 COD，BOD_5 环境容量

指标	年份	水环境总容量	情景一	情景二	情景三
COD_{cr}	2015	水质目标/(mg·L^{-1})	15	20	30
		理论环境总容量/(t·a^{-1})	−247.18	1 354.10	4 556.66
	2016	水质目标/(mg·L^{-1})	15	20	30
		理论环境总容量/(t·a^{-1})	−494.21	1 107.07	4 309.63
	2017	水质目标/(mg·L^{-1})	15	20	30
		理论环境总容量/(t·a^{-1})	−862.13	739.15	3 941.71
COD_{Mn}	2015	水质目标/(mg·L^{-1})	4	6	10
		理论环境总容量/(t·a^{-1})	−316.80	323.71	1 604.74
	2016	水质目标/(mg·L^{-1})	4	6	10
		理论环境总容量/(t·a^{-1})	−587.48	53.03	1 334.05
	2017	水质目标/(mg·L^{-1})	4	6	10
		理论环境总容量/(t·a^{-1})	−616.39	24.12	1 305.14
BOD_5	2015	水质目标/(mg·L^{-1})	3	4	6
		理论环境总容量/(t·a^{-1})	244.23	507.03	1 032.63
	2016	水质目标/(mg·L^{-1})	3	4	6
		理论环境总容量/(t·a^{-1})	377.70	640.50	1 166.10
	2017	水质目标/(mg·L^{-1})	3	4	6
		理论环境总容量/(t·a^{-1})	207.26	470.06	995.66

2.2　N，P 水环境容量结果及分析

2015 年至 2017 年实测阅海湖 TN 为 0.95，0.84，0.945 mg/L；NH_3-N 为 0.18，0.27，0.40mg/L；TP 为 0.77，0.89，0.86mg/L。保持现状水体不再恶化，阅海湖 2015 至 2017 年可依靠下泄流量及自身净化能力容纳 TN 为 86.25，76.36，85.91 t/a；NH_3-N 为 16.36，24.54，36.36 t/a；TP 为 7.00，8.09，7.82 t/a。根据狄龙模型、世界经济合作与发展组织(OECD)模型、合田健模型计算出 TN，NH_3-N，TP 水环境容量结果见表 6—7。

(1) 情景一。达到Ⅱ类水质目标情况下 TN、TP 的环境容量低于现状水体污染物负荷量，为达到水质标准，需消减 TN 为 47.3%，40.5%，47.1%；相比 2015 年，2016 年 TN 消减量减小 6.8%，2017 年减小 0.2%，说明水质在 2016 年有所提高，2017 年水质再次恶化，其浓度变化趋势与 BOD_5 具有一致性。需消减 TP 为 67.6%，71.9%，71.0%，TP 的削减量呈先增加后减小趋势，波动范围在 3.4%以内，水质总体呈恶化趋势。NH_3-N 环境容量 3 a 内均高于现状水体污染物负荷，有剩余环境容量，剩余 64.0%，46.0%，20.0%，剩余环境容量逐年减小，说明 NH_3-N 水质有恶化趋势。

(2) 情景二。达到Ⅲ类水质目标情况下，NH_3-N 达到水质标准且有剩余环境容量。TN 的环境容量 3 a内略大于现状水体污染物负荷量，有剩余环境容量，剩余 5.1%，16.0%，5.0%，2017 年剩余环境容量较 2015 年有所减小，水体呈恶化趋势，但不明显。TP 环境容量 3 a 内均小于现状水质污染物负荷量，为达到水质标准需要消减 TP 为 35.0%，42.6%，41.8%。

(3) 情景三。达到Ⅳ类水质目标情况下，TN，NH_3-N 达到水质标准。TP 环境容量 3 a 内大于现状水质污染物负荷量，有剩余环境容量，TP 环境容量剩余率为 23.0%，11.0%，14.0%。

表 6　2015—2017 年不同水质目标情景下阅海湖 TN 与 NH_3-N 环境容量(t/a)

年份	计算模型	情景一	情景二	情景三
2015	水质目标/(mg·L^{-1})	0.5	1.0	1.5
	理论环境总容量/(t·a^{-1})	45.45	90.91	136.36
2016	水质目标/(mg·L^{-1})	0.5	1.0	1.5
	理论环境总容量/(t·a^{-1})	45.45	90.91	136.36
2017	水质目标/(mg·L^{-1})	0.5	1.0	1.5
	理论环境总容量/(t·a^{-1})	45.45	90.91	136.36

表 7　2015—2017 年不同水质目标情景下阅海湖 TP 环境容量

年份	计算模型	情景一	情景二	情景三
2015	水质目标/(mg·L^{-1})	0.025	0.05	0.10
	理论环境总容量/(t·a^{-1})	2.27	4.55	9.09
2016	水质目标/(mg·L^{-1})	0.025	0.05	0.10
	理论环境总容量/(t·a^{-1})	2.27	4.55	9.09
2017	水质目标/(mg·L^{-1})	0.025	0.05	0.10L
	理论环境总容量/(t·a^{-1})	2.27	4.55	9.09

3 讨论与结论

阅海湖各水质指标浓度总体处于地表水Ⅱ类～Ⅳ类之间，在 3 种情景目标下阅海湖各指标水环境容量呈减小趋势，其水质逐年恶化是导致水环境容量减小的根本原因。阅海湖对各污染物有不同的环境容量，其对各污染物指标浓度限值不同、入湖污水中各因子含量不同、扩散及稀释过程不同、对水体产生的影响不同是造成各因子水环境容量存在差异性的主要原因[23]。

以 COD_{cr}，COD_{Mn}，BOD_5 为有机物污染指标分析结果来看，水体中 3 项指标的浓度年度间有小幅波动且环境容量呈减小趋势，说明有机污染物排入总量在增加，若排入量不受约束将造成水质进一步恶化，水环境容量进一步减小。BOD_5 虽达到Ⅱ类水质标准且有剩余环境容量，但其环境容量在 2016 年下降 31.9%后 2017 年又迅速上升 48%，说明 2017 年阅海湖有机污染物排入总量增加且入湖污染因子含量也在发生变化，即可被微生物降解的有机物入湖量有不确定性。沿岸农灌退水、水土流失及生活用水携带污染物入湖量的变化是造成这种现象的主要原因[24]。

以 TN，NH_3-N，TP 为营养物质指标分析结果来看，其中 NH_3-N 达到Ⅱ类水质标准且有剩余环境容量，可满足阅海湖生态湿地保护等功能，但其剩余环境容量从 64%减小至 20%，说明入湖污染物中 NH_3-N 总量逐年增加，若不加以控制将打破Ⅱ类水质标准。TN 浓度变化与 BOD_5 浓度变化趋势一致，说明 BOD_5 与 TN 浓度变化具有一定的正相关性，即入湖污水中可被微生物降解的部分含 N 量较高，生活污水携带含氮物质的排入是造成 TN 浓度变化的主要原因[19]。2015 年至 2016 年 TP 的浓度呈上升趋势，2017 年有小幅降低，其浓度接近Ⅳ类水质限值，若不消减 TP 排入量，其水质将降为劣Ⅴ类水，农业退水及水土流失是导致水质恶化的主要原因[19]。

综上所述，阅海湖水质总体为地表水Ⅳ类，其各污染物指标的环境容量呈逐年减小趋势，沿岸农灌退水、水土流失及生活用水携带营养物入湖是造成其水质恶化和水环境容量减小的主要原因。水质目标为Ⅱ类时，BOD_5，NH_3-N 有剩余环境容量，COD_{cr} 需消减 122.4%，142.7%，169.6%；COD_{Mn} 需消减 190.7%，243.8%，248.6%，TN 需消减 47.3%，40.5%，47.1%；TP 需消减 67.6%，71.9%，71.0%。水质目标为Ⅲ类时，BOD_5，NH_3-N，TN 有剩余环境容量，COD_{cr} 需消减 0%，4.4%，40.3%；COD_{Mn} 需消减 7.3%，85.7%，94.1%；TP 需消减 35.0%，42.6%，41.8%。水质目标为Ⅳ类时，各污染物指标均达到水质标准且环境容量呈减小趋势，其中 TP 浓度接近Ⅳ类水质标准限值，是阅海湖最主要污染因子。阅海湖具有生态湿地等功能要求，水质应达到地表水Ⅲ类及以上为宜，根据本文对阅海湖不同水质目标情景下最大环境容量评估结果，应控制有机物、营养盐入湖量，采取相应消减措施，使水质逐步达标。

[参 考 文 献]

[1] 董飞，刘晓波，彭文启，等. 地表水水环境容量计算方法回顾与展望[J]. 水科学进展，2014，25(3)：451-463.

[2] 刘丹，王烜，曾维华，等. 基于 ARMA 模型的水环境承载力超载预警研究[J]. 水资源保护，2019，35(1)：52-55，69.

[3] 许彦. 基于水功能区的流域水环境容量计算研究[J]. 环境与发展，2019，31(1)：187，189.

[4] 屈豪，包景岭，张维. 水环境承载力研究分析与展望[J]. 河北地质大学学报，2017，40(5)：25-30.

[5] 张昌顺，谢高地，鲁春霞. 中国水环境容量紧缺度与区域功能的相互作用[J]. 资源科学，2009，31(4)：559-565.

[6] Li Na, Yang Hong, Wang Lachun, et al. Optimization of industry structure based on water environmental carrying capacity under uncertainty of the Huai River Basin within Shandong Province, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 4594-4604.

[7] Zeng Weihua, Wu Bo, Chai Ying. Dynamic simulation of urban water metabolism under water environmental carrying capacity restrictions[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2016, 10(1): 114-128.

[8] 闫莉，郝岩彬，徐晓琳，等. 水环境承载能力相关概念分析[J]. 人民黄河，2009，31(11)：52-53.

[9] 吉晓燕. 军山湖入湖污染负荷及水环境容量研究[D]. 南昌：南昌大学，2011.

[10] 王寿兵，马小雪，张韦倩，等. 上海淀山湖水环境容量评估[J]. 中国环境科学，2013，33(6)：1137-1140.

[11] 樊华，陈然，刘志刚. 柘林水库水环境容量及水污染控制措施研究[J]. 人民长江，2009，40(24)：39-40，43.

[12] 欧阳球林，高桂青. 瑶湖水环境容量的研究[J]. 南昌工程学院学报，2008，27(1)：64-66.

[13] 李隽，许友. 岳阳南湖水环境容量计算及污染治理措施效果分析[J]. 岳阳师范学院学报：自然科学版，2001，14(2)：21-23.

[14] 宋学宏，邴旭文，孙丽萍，等. 阳澄湖养殖水体 COD 降解动力学研究[J]. 安徽农业大学学报，2010，37(2)：328-332.

（下转第 300 页）

[7] 张东杰,都耀庭.禁牧封育对退化草地的改良效果[J].草原与草坪,2006,26(4):52-54.
[8] 高天明,张瑞强,刘铁军,等.不同灌溉量对退化草地的生态恢复作用[J].中国水利,2011(9):20-23.
[9] 宝音贺希格,高福光,姚继明,等.内蒙古退化草地的不同改良措施[J].畜牧与饲料科学,2011,32(3):38-41.
[10] 荣浩,何京丽,珊丹,等.锡林河流域退化草地植被恢复措施及水土保持效应研究[J].草原与草坪,2016,36(5):52-57.
[11] Harris J A, Palmer J, Birch P. Land Restoration and Reclamation: Principles and Practice[M]. Singapore: Principles Hall, 1996.
[12] 周瑶,马红彬,贾希洋,等.不同生态恢复措施下宁夏黄土丘陵典型草原土壤质量评价[J].农业工程学报,2017,33(18):102-110.
[13] 卓莉,曹鑫,陈晋,等.锡林郭勒草原生态恢复工程效果的评价[J].地理学报,2007,62(5):471-480.
[14] 杨婷婷,吴新宏,李鹏,等.草原沙化治理工程生态效益快速评价体系研究[J].水土保持研究,2008,15(6):119-122.
[15] 荣浩,何京丽,张欣,等.荒漠草原不同植被恢复模式地上生物量与土壤水分的关系[J].草原与草坪,2018,38(5):71-76.
[16] 卫智军,韩国栋,赵钢,等.中国荒漠草原生态系统研究[M].北京:科学出版社,2013.
[17] Osunmadewa B A, Majdaldin R A, Csaplovics E, et al. Regional assessment of trends in vegetation change dynamics using principal component analysis[C]// Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XⅧ, 2016.
[18] 曾华星.基于主成分分析的流域生态效益对比评价:以西南地区西林县 12 个流域为例[J].有色冶金设计与研究,2018,39(4):98-102.
[19] 贺尧,苏芳莉,郭成久,等.基于主成分分析法的煤矸石山植被水土保持功能评价[J].水土保持研究,2009,16(1):74-77.
[20] 李宁宁,赵雨森.基于 DEA 的黑土地水土保持综合效益评价研究:以黑龙江省为例[J].中国农学通报,2014,30(34):178-181.
[21] Grace J B. The factors controlling species density in herbaceous plant communities: an assessment[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution & Systematics, 1999,2(1):1-28.
[22] 蒋德明,苗仁辉,押田敏雄,等.封育对科尔沁沙地植被恢复和土壤特性的影响[J].生态环境学报,2013,22(1):40-46.
[23] 刘凤婵,李红丽,董智,等.封育对退化草原植被恢复及土壤理化性质影响的研究进展[J].中国水土保持科学,2012,10(5):116-122.
[24] 葛庆征,魏斌,张灵菲,等.草地恢复措施对高寒草甸植物群落的影响[J].草业科学,2012,29(10):1517-1520.
[25] 唐华俊,辛晓平,李凌浩,等.北方草甸退化草地治理技术与示范[J].生态学报,2016,36(22):7034-7039.
[26] 薛晶,侯占峰,刘海洋,等.草原灌木带空气动力学粗糙度研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(6):253-256.
[27] 苗百岭,梁存柱,王炜,等.植被退化对典型草原地表径流的影响[J].水土保持学报,2008,22(2):10-14.
[28] 王猛,袁福锦,吴文荣,等.封育对滇西北亚高山草甸群落及土壤的影响[J].草原与草坪,2017,37(2):69-74.
[29] 宋梅玲,王玉琴,鲍根生,等.不同草地管理措施对狼毒型退化草地群落结构及牧草品质的影响[J].草业科学,2018,35(10):2318-2326.
[30] 金荣.退化草地恢复研究进展[J].内蒙古林业调查设计,2018,41(5):61-64.
[31] 刘延斌,张典业,张永超,等.不同管理措施下高寒退化草地恢复效果评估[J].农业工程学报,2016,32(24):268-275.

(上接第 294 页)

[15] 郑志伟,胡莲,邹曦,等.汉丰湖富营养化综合评价与水环境容量分析[J].水生态学杂志,2014,35(5):22-27.
[16] 王子轩,逄勇,罗缙,等.淀山湖流域平原河网水环境容量及控制断面水质达标方案研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(6):61-65.
[17] 范丽丽,沙海飞,逄勇.太湖湖体水环境容量计算[J].湖泊科学,2012,24(5):693-697.
[18] 金国花,谢冬明,邓红兵,等.鄱阳湖水文特征及湖泊纳污能力季节性变化分析[J].江西农业大学学报,2011,33(2):388-393.
[19] 张萌,祝国荣,周慜,等.仙女湖富营养化特征与水环境容量核算[J].长江流域资源与环境,2015,24(8):1395-1404.
[20] 白维东,亢小云,范金城,等.宁夏阅海湖水质综合评估[J].宁夏农林科技,2012,53(2):57-60.
[21] 李斌,白维东,杨永宇,等.阅海湖水环境因子时空分布特征及水环境综合评价[J].宁夏农林科技,2016,57(8):40-42,63.
[22] 胡胜华,王硕,史诗乐,等.武汉北太子湖水环境容量研究[J].绿色科技,2018(20):76-79,83.
[23] 唐文秀.汾河流域水环境承载力的研究[D].西安:西安理工大学,2010.
[24] 江明,曾维,佘健,等.白潭湖水质及其水环境容量分析[J].工业安全与环保,2016,42(4):81-84.