

重庆市水库型饮用水源地污染源分析与生态修复

李云成¹, 杨玲², 朱乾德³

(1. 水利部 水资源司, 北京 100053; 2. 重庆市水利局 水资源处 重庆 401147;
3. 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, 南京 210029)

摘要: 以重庆市38处水库型饮用水源地为研究对象, 分析了其水质现状, 以及农田施肥、水土流失、畜禽养殖、底泥污染等面源污染和生活污水、生活垃圾等点源污染对水源地的影响。在严格实行污染源控制基础上, 针对不同水质现状类型水库, 提出了修复改善型与维持优化型等两种生态环境恢复策略, 建议采取人工湿地、植被缓冲带、水土保持和水库清淤等生态修复措施, 保护水库型饮用水源地。

关键词: 水库型饮用水源地; 修复改善型; 维持优化型; 生态修复

中图分类号: X171 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0867-04

Pollution source analysis and ecological restoration for drinking water sources from reservoir in Chongqing City

LI Yun cheng¹, YANG Ling², ZHU Qian de³

(1. Ministry of Water Resources of the PRC, Beijing 100053, China; 2. Water Resource Department of Chongqing Water Resources Bureau, Chongqing 401147, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology and Water Resources and Hydraulic Engineering Science, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Thirty eight drinking water sources from reservoir in Chongqing City were selected to investigate the current water quality situation of drinking water sources from reservoirs, and the effects of nonpoint source pollution, such as agricultural fertilizer, soil erosion, livestock and poultry breeding, and sediment pollution, and point source pollution, such as sewage and garbage, on the drinking water sources from reservoir. In terms of different types of reservoirs, two strategies of restoration improvement and maintenance optimization were put forward to restore the ecology in addition to the strict control on the pollution source. Ecological restoration measures and strategies were also proposed to protect the drinking water sources, such as constructed wetlands, riparian buffer zone, soil water conservation, and sediment dredge.

Key words: drinking water source from reservoir; restoration improvement; maintenance optimization; ecological restoration

饮用水安全直接关系到人民群众生命健康和社会和谐稳定大局, 是全面建设小康社会的物质基础与重要保障^[1-2]。随着经济社会发展、人口增长和城市化进程加快, 水资源的供需矛盾突出, 饮用水源地安全形势十分严峻^[3], 饮用水源地安全问题已成为制约城市社会经济发展的关键因素^[4-6]。

根据社会经济发展规划, 重庆市划分为都市功能核心区、都市功能拓展区、城市发展新区、渝东北生态涵养发展区、渝东南生态保护发展区五个功能区域。本文以重庆市的上述五个功能区为基本单元, 研究重庆市水库型饮用水源地水质现状, 甄别水库型饮用水源地污染物的主要来源, 探讨五大功能区水库型饮用水源地的生态修复类型与方式, 提出保护水库型饮用水源地的水生态修复措施与对策。

1 研究区域

重庆位于中国内陆西南部、长江上游地区, 域内水系丰富, 流经的重要河流有长江、嘉陵江、乌江、涪江、綦江、大宁河等。长江干流自西向东横贯全境, 流程665 km。全市幅员面积8.24万 km², 辖38个区县(自治县)。户籍人口3343万人, 常住人口2945万人, 常住人口城镇化率57%, 其中主城建成区面积650 km², 常住人口约800万人^[7]。本研究选择重庆市38处水库型饮用水源地作为研究对象。

重庆市五个功能区的空间位置和社会经济状况见图1、表1。因城市发展核心区尚无水库型饮用水源地, 因此, 在分析过程中主要以其余四个主要功能区为主。城市发展新区

收稿日期: 2014-09-01 修回日期: 2015-07-13 网络出版时间: 2015-09-24
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2034.014.html>
基金项目: 中央级公益性科研院所科研专项基金(Y515002; Y513001; Y513011; Y512009)
作者简介: 李云成(1978-), 男, 河南南阳人, 高级工程师, 主要从事水资源保护方面的研究。E-mail: liyc@mwtr.gov.cn

人口最多,占重庆市总人口的 37.55%,渝东南生态保护区人口最少,仅占重庆市总人口的 11.14%;渝东南生态保护区经济较为发达,经济生产总值占重庆市的 37.22%,渝东北生态涵养发展区经济欠发达,经济生产总值仅占重庆市的 11.53%;都市功能拓展区的城镇化率最高,达 85.41%,渝东南生态保护区城镇化率最低,达 33.36%。重庆市的四个主要功能区人口分布不均,经济发展不均衡。

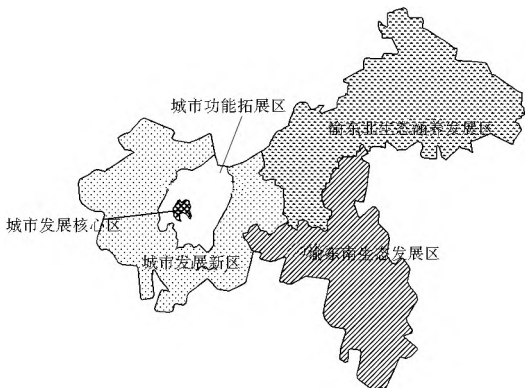


图 1 重庆市主要功能区分布

Fig. 1 Distribution of main functional zones in Chongqing City

表 1 重庆市主要功能区分布

Tab. 1 Social and economic situation for different functional districts in Chongqing city

主要功能区	城镇化率 (%)	人口占比 (%)	生产总值占比 (%)
城市发展新区	53.09	37.546 28	21.989 26
都市功能拓展区	85.41	16.508 06	24.737 82
渝东北生态涵养发展区	40.44	33.123 17	11.525 89
渝东南生态保护区	33.36	11.144 78	37.224 25

2 水源地水质污染现状和污染类型

采用地表水环境质量标准(GB 3838-2002) III 类水质标准对水库型饮用水源地进行水质评价,有 31 座水库的水质不达标,主要超标项目为高锰酸盐指数、总磷、总氮、氨氮,其余 7 座水库水质也存在潜在污染风险。

从水源地超标项目可以看出,重庆市水库型饮用水源地主要污染物为营养盐污染。根据污染物来源,可以划分为面源污染与点源污染,其中面源污染包括底泥污染、农田施肥、畜禽养殖、水土流失四类;点源污染可分为生活污水和生活垃圾两类。

2.1 面源污染

对于水库型饮用水源地,根据污染物来源可以将面源污染主要分为包括农田施肥型、水土流失型、畜禽养殖型和底泥污染等四种污染类型。表 2 是重庆市各功能区面源污染类型水源地个数及其相应比例。

2.1.1 农田施肥

农田施肥是农业面源污染的主要来源。超过作物需要的氮肥、磷肥在降雨径流作用下,随着农田排水沟渠逐级汇流至水库水体,导致水体富营养化,出现蓝藻水华现象,从而严重威胁饮用水源地安全^[8]。重庆市水库型饮用水源地

表 2 重庆市各功能区面源污染类型水源地个数及其相应比例

Tab. 2 Numbers and its proportions of various types of diffusenpoint sourcepollution for different functional districts zones in Chongqing City

功能区	农业施肥		水土流失		畜禽养殖		底泥污染	
	个数	比例 (%)	个数	比例 (%)	个数	比例 (%)	个数	比例 (%)
城市发展新区	13	36.1	8	47.1	4	28.6	1	25.0
都市功能拓展区	5	13.9	2	11.8	2	14.3	0	0.0
渝东北生态涵养发展区	13	36.1	6	35.3	3	21.4	1	25.0
渝东南生态保护区	5	13.9	1	5.9	5	35.7	2	50.0

汇水区域的农田施肥量严重偏高,农田施肥导致的水源地水质不达标的水源地数量占重庆市水库型饮用水源地的 94%,各功能区均存在严重的农田施肥污染,特别是城市发展新区、渝东北生态涵养发展区受农田施肥污染影响最为严重(表 2),这是由于这两个功能区的人口较多,区域城镇化率不高,农田面积较大。加强该地区农田养分管理,根据土壤肥力施用科学配比肥料,推广缓释肥技术,均是控制农田施肥污染的有效措施。

2.1.2 水土流失

水土流失是面源污染发生的重要形式,累积在地表的颗粒物由于过度垦殖、不合理的生产活动和土地利用方式,在流水、重力或者人为的作用下导致土壤侵蚀和氮磷养分流失^[9]。水土流失型面源污染在重庆市主要功能区均有分布,占全市水库型饮用水源地的 44.7%(表 1),但主要集中在城市发展新区,占比 47.1%;其次是渝东北生态涵养发展区,占比 35.3%。城市发展新区和渝东北生态涵养发展区人口多,经济快速发展,建筑施工、修路盖厂等对地表干扰活动较为频繁,高强度的土地利用方式易引发水土流失。对水库型饮用水源地周边的国土利用应进行严格管理,加强水土保持措施。

2.1.3 畜禽养殖

畜禽养殖废弃物中所含的氮、磷营养物是造成水体富营养化的主要原因之一,亦是面源污染物的主要来源。畜禽养殖废弃物含有的致病菌如大肠杆菌、沙门氏菌等是人类的 10 到 100 倍,有 40 多种疾病能够通过粪水传给人类,大型养殖场释放的高浓度硫化氢气体能够导致大脑损伤以及类流感症状,畜禽养殖污染物进入水库型饮用水源地将会影响重庆市居民的饮水安全,严重威胁人体健康。畜禽养殖污染水源地占到重庆市水库型饮用水源地的 36.8%。在重庆市各主要功能区的水库型饮用水源地均有分布,渝东南生态保护区畜禽养殖污染最为严重,有 5 处水库型饮用水源地受到污染,占重庆市饮用水源地的 35.7%;其次是城市发展新区,占 28.6%(表 2)。渝东南生态保护区和城市发展新区的农业化程度较高,禽畜养殖较为普遍,且大都位于河湖周边,禽畜养殖污染情况较为严重。应加强畜禽养殖废弃物的管理与处置,确保废水能够达标排放。

2.1.4 底泥污染

底泥是入水库营养盐等各种污染物的主要蓄积场所,当

底泥蓄积饱和后,底泥中的氮、磷和有机质向水体的释放可以给水生生物提供丰富的营养来源,释放过多则会造成水体富营养化,极易引发二次污染^[10]。监测结果表明,重庆市水库型饮用水源地受到底泥污染的达4个,占水库型饮用水源地的10.1%,主要集中在渝东南生态保护区,占重庆市饮用水源地的50.0%。对于底泥污染,应适时开展水库清淤工作加以控制。

2.2 点源污染

重庆市水库型饮用水源地周边均没有工业废污水排放,点源污染主要是周边居民生活污水和没有得到及时有效处理的生活垃圾。表3是重庆市各个功能区不同点源污染类型水源地个数及其相应比例。

表3 重庆市各功能区不同点源污染类型水源地个数及其相应比例

Tab. 3 Numbers and their proportions of various types of point source pollution for different functional districts zones in Chongqing City

功能区	生活污水		生活垃圾	
	个数	比例(%)	个数	比例(%)
城市发展新区	11	33.3	3	17.6
都市功能拓展区	5	15.2	4	23.5
渝东北生态涵养发展区	11	33.3	5	29.4
渝东南生态保护区	6	18.2	5	29.4

2.2.1 生活污水

生活污水中的含磷洗衣粉、厨余用水、粪便等均是导致水体变差的主要因素。农村地区的生活污水尚未接入城市管网系统,无法进入污水处理厂统一处理,肆意乱排乱放现象较为严重,受到生活污水污染的水源地占到重庆市水库型饮用水源地的86.8%。其中,城市发展新区和渝东北生态涵养发展区受生活污水影响的水源地比例最高,均占重庆市饮用水源地的33.33%(表3)。城市发展新区和渝东北生态涵养区均是城镇化率较高的地区,居民人数较多,产生的生活污水相对较多。应严格控制生活污水的排放,加强对生活污水的净化处理。

2.2.2 生活垃圾

生活垃圾属于固体废物,但不及时处理或者处置不当,露天堆放的生活垃圾会产生氨、硫化物等有毒物质,受到降水的影响形成淋溶液,含有大量病原菌的淋溶液排进水库。受到生活垃圾污染的水库型饮用水源地占到重庆市的44.7%。渝东南生态保护区和渝东北生态涵养发展区最多,均有5处受到威胁,均占重庆市饮用水源地的29.41%;其次是都市功能拓展区,占重庆市饮用水源地的23.53%(表3)。渝东南生态保护区和渝东北生态涵养区城镇化率虽然较低,但农业生活垃圾和垃圾填埋场较多,且易产生含氮、磷、硫化物等富营养物质污染水体。应加强对生活垃圾进行严格遴选处理,规范生活垃圾填埋场的管理,以防农村生活垃圾污染水体。

3 水库型水源地水生态修复措施

针对水源地受到的面源或点源污染,除了对污染源进行

严格控制外,需要采取生态工程措施对38处水库型饮用水源地进行水生态修复。根据现有水源地水质污染和水生态状况,水生态修复类型可以分为两类:一类是修复改善受损水体为主的修复改善型,另一类是防止水体水质恶化的维持优化型。受污染程度较高的水源地属于修复改善型,污染程度较轻的水源地属于维持优化型,具体属于修复改善型还是维持优化型需要综合考虑自然地理、社会经济、技术方案等多种因素。

重庆市修复改善型和维持优化型水库的数量分别占重庆市水库型饮用水源地的81.6%和18.4%,说明大多数水库型饮用水源地污染情况严重。其中,城市发展新区、都市功能拓展区、渝东北生态涵养发展区采取修复型方案的饮用水源地远远大于维持优化型,渝东南生态发展区修复型与维持优化型水库的数量接近。一般来说,人口较多的功能区水库型饮用水源地污染较为严重,亟需进行修复改善,而人口较少的功能区,水库型饮用水源地水质相对较好,仅需维持优化。

3.1 人工湿地

人工湿地是由人工建造和控制运行的与自然湿地相类似的人工建筑物,主要包括植物、土壤和填料组成,污水流经人工湿地时通过物理、化学、生物三重协同作用,对污水进行处理的一种技术。其作用机理包括吸附、滞留、过滤、氧化还原、沉淀、微生物分解、转化、植物遮蔽、残留物积累、蒸腾水分和养分吸收及各类动物的作用^[11-12]。人工湿地建造和运行费用较低,易于维护,可缓冲水力和污染负荷的冲击。根据水流方向,人工湿地可以分为表面流、水平潜流和复合垂直流人工湿地。

(1) 基质配置。重庆市水库型饮用水源地水体多为水体氮磷营养物超标,可选择钢渣、炉渣、页岩等能够吸附水体中磷素的填料作为基质,在填料适当添加有机质可以增加反硝化作用。针对生活垃圾、生活污水、畜禽养殖等污染源,可选吸污能力较好的泥炭作为搭配基质。进行基质配置时需要注意考虑基质的级配、孔隙率、水力负荷等多种因素。

(2) 植物配置。植物配置应综合考虑人工湿地类型、气候类型、植物覆盖率、基质种类和经济成本等多种因素。重庆气候温暖,尽量选择本地植物,种植期宜选在春季,种植密度合理,生长特性应与基质特性相适应。对于表面流人工湿地可配置沉水植物、浮叶植物,对于水平潜流和垂直潜流人工湿地可以配置挺水植物。植物应选择具有一定的抗倒伏能力,且生长期不易产生二次污染,容易收割与维护等^[13-14]。

人工湿地可用于农田施肥污染、水土流失和畜禽养殖污染的防治,生活污水的防治也可以采用人工湿地措施。

3.2 植被缓冲带

植被缓冲带是目前国外采用最为普遍的非点源污染生态控制技术之一。在河流、水库或者湖泊等水体周边的植被,如水生植物、树木、灌木和草丛等,形成围绕水体具有一定的结构和功能的植物生物群落。植被缓冲带又称为植被过滤带、岸边缓冲带、河(湖、库)岸带、湖滨带。植被缓冲带通过增加入渗、减缓水流,沉淀吸附,生物吸收等物理化学和生物机制,可以很好地滞留、吸收和减少非点源污染物。植

被缓冲带去除非点源污染物的效率同它的类型、组成、宽度、土壤性质、水文条件等诸多因素密切相关。通常情况下,植被缓冲带宽度越宽和流速越慢,则去除非点源污染物的效果就越好。植被缓冲带不仅可以有效地去除陆地来源的非点源污染物,而且可以作为水中氮素的天然“生化反应器”。

植被缓冲带设计的关键参数有植被宽度、缓冲带坡度、植被物种搭配等。

重庆市饮用水源地以大中型水库为主,因此建议设置较宽的植被缓冲带,并设立较缓的坡度。宽度宜设置在 30~35 m 范围内,坡度保持在 3%~5% 之间为最佳。具体设置时可根据水库面积及污染程度高低的具体情况进行调整。

3.3 水土保持措施

水土保持措施可以用于水土流失造成的面源污染防治。

(1) 拦蓄措施。在水库尾部等较易产生泥沙的位置设立沉砂池、设立挡水坝,对污染物进行拦截,并定时进行清理,以解决水土流失严重而导致库尾淤积严重的问题。

(2) 种植植物。借助乔、灌木林冠层、枯枝落叶层对地表径流进行调蓄,植物可吸收水体中污染物质,改善径流水质。水库型饮用水源地实施该工程措施时,应考虑采用水库管理范围内的用地,尽量不占周边居民的土地。在水库蓄水期间水位增高应考虑因水位变化对植物生长造成的影响。

3.4 水库清淤

水库定时清淤可减少受污染的底泥对水库水质的潜在影响。根据水库蓄水状况,提出两种清淤方案。

(1) 针对具有放水排干自然放空条件、清淤时间充裕的水库,可选用放空水库实地机械清淤。水库放干后淤泥厚度小于 1 m 的施工区域,采用推土机将淤泥集中在一起,采取污染消除措施后汽车运至堆填场填埋。对于淤泥厚度大于 1 m 的施工区域,清污处理后,先对底泥进行陆地固化处理,由机械直接挖运至弃渣场。该方法比较直接、可靠,施工环节少,单位投资较低,但清淤时间相对较长。

(2) 不具备上述条件或者清淤时间紧急的水库,可采取水下清淤方案进行清淤。先由挖泥船吸走淤泥,清污处理后运至弃渣场,固化处理后填埋。该方法施工条件要求低、工作性质可靠、施工时间短,但工程投资较高且工程量较大。

4 结论

重庆市 38 处水库型饮用水源地中有 31 座水库的水质不能满足地表水环境质量标准(GB 3838-2002) III 类水质要求,不达标率达到 81.6%,水源地水体超标项目主要包括氮磷营养盐和有机污染物。农田施肥、生活污水是重庆市水库型饮用水源地主要污染源,其数量分别占水库型饮用水源地的 94.7%、86.8%。根据水源地污染现状,就重庆市不同功能区提出了修复改善型和维持优化型两种水生态修复思路,提出了构造人工湿地、植被缓冲带、水土保持和水库清淤等水生态修复措施。

建议未来加大水源地污染物输出特征的监测力度,合理定量评估水源地周边污染负荷输出规律,为有针对性地制定污染源控制措施提供数据支撑。水生态修复措施具有不同的适用条件和建设要求,建议根据每个水源地具体情况制定

水生态修复方案,做好水生态修复方案的设计、论证以及投资需求估算等前期工作,以便能够在客观条件具备时及时启动水源地水生态修复工程。

参考文献(References):

- [1] 吴巍,周孝德,程文,等.水电开发对其影响区内饮用水水源地水质的影响研究[J].水力发电学报,2010,29(1):13-18.(WU Wei,ZHOU Xiaode,CHENG Wen,et al.Research on the influence of hydroelectric development on the water quality of drinking water source zone in the influence area[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2010,29(1):13-18.(in Chinese))
- [2] 陈炼钢,陈敏建,丰华丽.基于健康风险的水源地水质安全评价[J].水利学报,2008,39(2):235-244.(CHEN Lianggang,CHEN Minjian,FENG Huali,Water source quality safety evaluation based on health risk assessment[J].Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(2):235-244.(in Chinese))
- [3] 颜淼,陈求稳,李伟峰,等.重要水源地小流域水环境动态模拟及调控研究[J].水利学报,2007,38(9):1038-1049.(YAN Miaoyao,CHEN Qiurwen,LI Weifeng,et al.Dynamic simulation and management of aquatic environmental capacity of small catchments in important water source area[J].Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(9):1038-1049.(in Chinese))
- [4] 朱党生,张建永,程红光,等.城市饮用水水源地安全评价(I):评价指标和方法[J].水利学报,2010,41(7):778-785.(ZHU Dangsheng,ZHANG Jianyong,CHEN Hongguang,et al.Security assessment of urban drinking water sources I:indicator system and assessment method[J].Journal of Hydraulic Engineering,41(7):778-785.(in Chinese))
- [5] 朱党生,张建永,史晓新,等.城市饮用水水源地安全评价(II):全国评价[J].水利学报,2010,41(7):778-785.(ZHU Dangsheng,ZHANG Jianyong,SHI Xiaoxin,et al.Security assessment of urban drinking water sources II:Security assessment for cities in China[J].Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(8):914-920.(in Chinese))
- [6] 张俊艳,韩文秀.城市水安全问题及其对策探讨[J].北京科技大学学报:社会科学版,2005,21(2):78-81.(ZHANG Junyan,HAN Wenxiu.Exploration on urban water security and its counter measures[J].Journal of University of Science and Technology Beijing:Social Science Edition,2005,21(2):78-81.(in Chinese))
- [7] 黄可,童泽圣.重庆统计年鉴 2013[M].北京:中国统计出版社,2013.(HUANG Ke,TONG Zesheng.Chongqing statistical yearbook 2013[M].Beijing:China Statistics Press,2013.(in Chinese))
- [8] 何浩然,张林秀,李强.农民施肥行为及农业面源污染研究[J].农业技术经济,2006(6):2-10.(HE Haoran,ZHANG Linxiu,LI Qiang.Research on fertilizer application practice by farmers and agricultural nonpoint source pollution[J].Agriculture technological economy,2006(6):2-10.(in Chinese))
- [9] 莫明浩,方少文,涂安国,等.水土流失面源污染及其防控研究综述[J].中国水土保持,6:32-34.(MO Minghao,FANG Shaowen,TU An guo et al.Review on nonpoint source pollution from soil erosion and water loss and its control measures[J].China soil and water conservation,2012(6):32-34.(in Chinese))

(下转第 882 页)

- ings of 7th International Drainage Symposium. ASAE: St. Joseph, MI, 1998: 621-628.
- [3] Keddy P. Wetland restoration: The potential for assembly rules in the service of conservation[J]. *Wetlands*, 1999, 19: 716-732.
- [4] Mayer T D, Thomasson R. Fall water requirements for seasonal diked wetlands at lower Klamath National Wildlife Refuge [J]. *Wetlands*, 2004, 24: 92-103.
- [5] Eamus D, Hatton T, Cook P, et al. *Ecophysiology: Vegetation Function, Water and Resource Management*. Melbourne: CSIRO Publishing, 2006.
- [6] Roberts J, Young B, Marston F. *Estimating the Water Requirements for Plants of Floodplain Wetlands: A Guide*. Australia: Land and Water Resources Research & Development Corporation, 2000.
- [7] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康的时空尺度特征[J]. *应用生态学报*, 2003, 13(10): 121-125. (CUI Bao shan, YANG Zhi feng. Spatial and temporal scales of wetland ecosystem health[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2003, 13(10): 121-125. (in Chinese))
- [8] 孙晓梅, 曲延光. 莫莫格湿地生态环境需水量研究[J]. *东北水利水电*, 2007, 25(1): 54-55. (SU N Xiao mei, QU Yan guang. Research into momo wetland ecological environment water demand[J]. *Northeast of Water Resources and Hydropower*, 2007, 25(1): 54-55. (in Chinese))
- [9] 唐占辉, 马逊风. 向海湿地生态需水量的初步研究[J]. *吉林水利*, 2003(12): 1-2. (TANG Zhan hui, MA Xun feng. The preliminary research on the wetland ecological water requirement to the sea[J]. *Jilin Water Resources*, 2003(12): 1-2 (in Chinese))
- [10] 赵东升, 吴正方, 商丽娜. 洪河保护区湿地生态需水量研究[J]. *湿地科学*, 2004, 2(2): 133-138. (ZHAO Dong sheng, WU Zheng fang, SHANG Li na. The low reserve wetlands ecological water requirement study[J]. *Wetland Science*, 2004, 2(2): 133-138. (in Chinese))
- [11] 郭跃东, 何岩, 邓伟, 等. 扎龙国家自然湿地生态环境需水量研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 163-166. (GUO Yue dong, HE Yan, DENG Wei. Research into Zhalong national natural wetland ecological environment water demand[J]. *Journal of soil and water conservation*, 2004, 18(6): 163-166. (in Chinese))
- [12] 丁圣彦, 梁国付, 姚孝宗, 等. 河南沿黄湿地景观格局及其动态研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (DING Sheng yan, LIANG Guo fu, YAO Xiao zong. Research into Henan province along the yellow wetland landscape pattern and its dynamic. (in Chinese))
- [13] 赵少延. 三门峡库区湿地生态需水量研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013 (ZHAO Shaoyan. Wetland ecological water requirement in Sanmenxia reservoir area[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese))
- [14] 董仁, 隋福祥, 张树辉. 应用彭曼公式计算作物需水量[J]. *黑龙江水专学报*, 2006, 33(2): 100-101. (DONG Ren, SUI Fuxiang, ZHANG Shu hui. Application of crop water requirement in the penman formula[J]. *Journal of Heilongjiang Hydraulics Engineering College*, 2006, 33(2): 100-101. (in Chinese))
- [15] 李晓军, 李取生. 东北地区参考作物蒸散确定方法研究[J]. *地理科学*, 2004, 24(2): 212-216. (LI Xiaojun, LI Qusheng. Method to determine the reference crop evapotranspiration in northeast China[J]. *Geographical Science*, 2004, 24(2): 212-216. (in Chinese))
- [16] John D. Valiantzas. Simplified Versions for the Penman evaporation equation using routine weather data[J]. *Journal of Hydrology*, 2006: 690-702.
- [17] 徐艳菲, 张义文, 焦明, 等. 永年洼湿地生态需水量初步研究[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(9): 2031-2034. (XU Yan fei, ZHANG Yi wen, JIAO Ming. Preliminary studies Yongnian Wa wetland ecological water requirement[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(9): 2031-2034. (in Chinese))
- [18] 严军, 苗卉, 柴洪敏. 永定河下游河道输沙需水量[J]. *人民黄河*, 2006, 28(2): 51-53. (YAN Jun, MIAO Hui, CHAI Hong min. Yongding river downstream water requirement of river sediment[J]. *Yellow River*, 2006, 28(2): 51-53. (in Chinese))
- [19] 严军, 胡春宏. 黄河下游河道输沙需水量的计算方法及应用[J]. *泥沙研究*, 2004(4): 25-32. (YAN Jun, HU Chun hong. The calculation method of the lower reaches of the Yellow River water requirement of river sediment and applications[J]. *Journal of Sediment Research*, 2004(4): 25-32. (in Chinese))
- [20] 于松延, 徐宗学, 武玮. 基于多种水文学方法估算渭河关中段生态基流[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(2/3): 175-179. (YU Song yan, XU Zong xue, WU Wei. Based on a variety of hydrology method for estimating the guanzhong weihe river ecological base flow[J]. *Journal of Beijing Normal University*, 2013, 49(2/3): 175-179. (in Chinese))

(上接第 870 页)

- [10] 沈亦龙, 何晶晶, 邵立明. 太湖五里湖底泥污染特性研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(6): 584-588. (SHEN Yi long, HE Pi jing, SHAO Li ming. Characteristics of contaminated sediments in wuli lake of Tai lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(6): 584-588. (in Chinese))
- [11] 李跃勋, 徐晓梅, 何佳, 等. 滇池流域点源污染控制与存在问题解析[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(5): 633-639. (LI Yue xun, XU Xiao mei, HE Jia, et al. Point source pollution control and problem in Lake Dianchi Basin[J]. *Journal of Lake Science*, 2010, 22(5): 633-639. (in Chinese))
- [12] 汪国华. 大共同体与差序格局互构: 我国农村点源污染治理困境研究[J]. *中国农业大学学报: 社会科学版*, 2012, 29(1): 45-50. (WANG Guo hua. Mutual constructing of great community and the differential mode of association: research on the governance dilemma of rural point source pollution[J]. *China Agricultural University Journal of Social Sciences Edition*, 2012, 29(1): 45-50. (in Chinese))
- [13] 杨旭, 张雪萍, 王继富, 等. 人工湿地组合工艺处理对含油含污水净化效果研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(4): 662-665. (YANG Xu, ZHANG Xue ping, WANG Ji fu, et al. Purification efficiency of the constructed wetland combined process for oil wastewater[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(4): 662-665. (in Chinese))
- [14] 单立楠, 丁能飞, 王洪才, 等. 蔬菜地面源污染生态拦截系统与效果[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(20): 168-178. (SHAN Li nan, DING Neng fei, WANG Hong cai, et al. Effect of ecological interception system in reducing non point source pollution from vegetable fields[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(20): 168-178. (in Chinese))