

文章编号: 1000-7709(2019)07-0030-05

我国北方重点煤电基地发展伴生的水资源压力分析

陈倩云^a, 安婷莉^a, 王玉宝^a, 韩昕雪琦^a, 高学睿^b

(西北农林科技大学 a. 水利与建筑工程学院; b. 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 鉴于煤电基地的快速扩张会给区域水资源保障带来极大的压力, 运用生命周期评价方法计算了2006~2015年我国北方九大煤电基地煤炭生产和火力发电的水足迹, 提出了虚拟水流出伴生的水资源压力指数, 评价了煤电虚拟水外送给当地水资源系统造成的压力, 分析了未来煤电基地发展的水资源适配性。结果表明, 九大煤电基地煤炭生产和火力发电的年均水足迹为 $13.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占当地淡水资源可用总量的 22.8%, 煤炭和电力外送伴生的虚拟水流出总量持续增加, 增长率为 $3\ 031.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 近 10 年来, 水资源压力指数呈现上升趋势, 六个煤电基地达到中度压力等级, 造成巨大的水资源压力; 2020 年, 九大煤电基地总水足迹为 $15.7 \times 10^8 \text{ m}^3$, 区域可供煤电基地的水资源量为 $11.9 \times 10^8 \text{ m}^3$, 只有晋北和准东的水资源满足未来基地扩张需要; 晋中、晋东、陕北和鄂尔多斯通过优化调度等增加区域可供水量后可以满足未来生产需要; 宁东和哈密发展所需的水资源与供给能力严重不匹配, 应调整发展战略, 保障基地用水安全。

关键词: 煤电基地; 水足迹; 虚拟水; 生命周期; 水压力指数

中图分类号: TV211

文献标志码: A

1 概况

国务院发布的《能源发展战略行动计划》基于满足未来社会发展对能源需求的增长、保障国家能源安全的目的, 在“十三五”期间将优先发展准东、哈密、宁东、鄂尔多斯、锡林郭勒、陕北、晋中、晋北和晋东九个以电力外送为主的现代化煤电基地。九大煤电基地均位于我国的干旱半干旱地区, 水资源匮乏, 水生态环境恶劣。煤电基地的快速扩张, 会给区域水资源保障带来极大的压力^[1]。为此, 本文运用水足迹和虚拟水理论研究了九大煤电基地发展的水资源—能源关系适配性, 通过分析煤电基地的用水现状和产能规模, 揭示 2006~2015 年煤电基地发展的水资源耗用的时空特征, 分析煤电基地煤炭和电力外送伴生的虚拟水流动格局及附加的水资源压力, 在此基础上, 按照国家和地区对煤电基地的发展布局和扩张规模, 结合区域对未来水资源的规划, 预测 2020 年煤电产业发展的水资源支撑保障能力, 进而分析

未来煤电基地的水资源—能源适配性, 并提出针对性建议, 为构建煤电基地水资源—能源协同安全评价体系提供重要的理论依据。

2 研究方法和数据

2.1 研究方法

2.1.1 煤炭水足迹

生命周期评价方法(LCA)是分析产品或服务在生产、消费和最终处置阶段环境影响的有效工具^[2]。生命周期评估框架下水足迹核算方法, 首先要确定涵盖的能源类型和生命周期阶段, 然后再计算水足迹。本文分析的煤电生命周期中水足迹的系统边界见图 1。本文重点研究九大煤电基地的水资源短缺和利用的可持续性, 只计算蓝水足迹, 不包括灰水足迹。

煤电的生命周期主要包括煤炭生产和发电两个阶段。煤炭生产阶段主要有原煤开采、原煤加工及动力煤生产, 发电阶段主要包括热力系统、冷却系统和辅助系统。因此, 煤电的水足迹主要包

收稿日期: 2018-08-14, 修回日期: 2018-10-08

基金项目: 国家重点实验室开放研究基金(IWHR-SKL-201601); “十三五”国家重点研发计划课题(2016YFC0401301)

作者简介: 陈倩云(1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向为能源水足迹和虚拟水, E-mail: yzsg940924@163.com

通讯作者: 王玉宝(1975-), 男, 博士、研究员, 研究方向为农业水土资源与节水灌溉, E-mail: wyb0406@sina.com

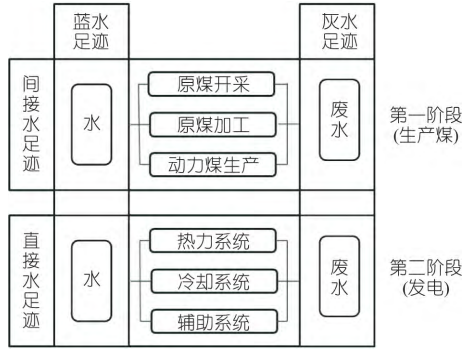


图 1 本研究水足迹计算的系统边界

Fig.1 System boundary of the WF calculation in this study 包括煤炭生产过程的间接水足迹和发电过程中的直接水足迹,计算公式为:

$$W_i = W_d^i + \mu W_{id}^i \quad (1)$$

其中 $W_d^i = w_{f_c} \theta_c + w_{f_a} \theta_a + w_{f_t} + w_{f_a}$ (2)

式中, W_i 为 i 基地煤电生产的单位水足迹, $m^3/(kW \cdot h)$; W_d^i 为 i 基地发电过程中单位发电量的直接蓝水足迹, $m^3/(kW \cdot h)$; μ 为转换系数,即生产每单位电力的煤耗 ($kg/(kW \cdot h)$),一般情况下, μ 在 0.30~0.35 之间; W_{id}^i 为 i 基地煤炭生产和制备过程中单位煤炭产量的平均水足迹, m^3/kg ; w_{f_c} 为封闭循环冷却系统冷却过程中单位发电量的蓝水足迹, $m^3/(kW \cdot h)$; θ_c 为封闭循环冷却系统装机容量在总装机容量中所占比例; w_{f_a} 为空气冷却系统冷却过程中单位发电量的蓝水足迹, $m^3/(kW \cdot h)$; θ_a 为空气冷却系统装机容量在总装机容量中所占比例; w_{f_t} 为生产每单位煤电在辅助系统中的蓝水足迹, $m^3/(kW \cdot h)$; w_{f_a} 为生产每单位煤电在辅助系统中的蓝水足迹, $m^3/(kW \cdot h)$ 。

间接单位水足迹:

$$W_{id}^i = w_{f_m} + \alpha_i w_{f_w} \quad (3)$$

式中, w_{f_m} 为开采过程中单位煤炭产量的蓝水足迹, m^3/t ; w_{f_w} 为洗选过程中单位煤炭产量的蓝水足迹, m^3/t ; α_i 为 i 能源基地中煤被洗选的比率。

2.1.2 虚拟水流动伴生的修正水资源压力指数

虚拟水流出量是指内嵌于煤炭和电力中,伴随其流动而输出的虚拟水量。计算公式为:

$$V_{w_i} = W_i T_e^i + W_{id}^i T_c^i \quad (4)$$

式中, V_{w_i} 为基地总虚拟水流出量, m^3 ; T_e^i 为 i 基地输出的总电量, $kW \cdot h$; T_c^i 为 i 基地输出的煤炭总量, t 。

水资源压力指数 (W_{wsi})^[3] 是指从现有的当地水资源中取水而产生的水资源压力。基于现有水资源压力指数概念,提出了一种修正的水压力指数 (M_{wsi}) 来量化由煤炭调运和电力输送引起

的虚拟水流出对能源基地水资源短缺的影响,计算公式为:

$$M_{wsi_j} = (V_{w_j} / L_{Q_j}) \times 100\% \quad (5)$$

式中, M_{wsi_j} 为 j 基地煤炭和电力输出引起的水资源压力; V_{w_j} 为随着煤炭和电力贸易而从 j 基地流出的总虚拟流量, m^3 ; L_{Q_j} 为“三条红线”水资源控制框架下 j 基地可利用水资源的上限, m^3 。

M_{wsi} 将水资源短缺程度分为四个等级,即无压力 ($M_{wsi} \leq 0.2M_{wsi_{in}}$)、轻度压力 ($0.2M_{wsi_{in}} < M_{wsi} \leq 0.4M_{wsi_{in}}$)、中度压力 ($0.4M_{wsi_{in}} < M_{wsi} \leq 0.8M_{wsi_{in}}$) 和重度压力 ($0.8M_{wsi_{in}} < M_{wsi} \leq M_{wsi_{in}}$)。

其中, $M_{wsi_{in}}$ 为一个地区工业生产引起的水资源压力,用式(5)计算, V_{w_j} 用工业用水量来代替。

2.2 数据来源

煤电基地的煤炭产量、发电量和调出量主要来自各地区的能源统计年鉴。2020 年煤炭和电力产量的规划数据来自国家和地区的“十三五”规划、《煤炭工业发展“十三五”规划》、《能源发展战略行动计划》及国家和地区的中长期规划。各地区煤炭开采、洗选和火力发电的行业准入用水标准来自《取水定额》(GB/T 18916-2012)和各地区制定的用水定额(如内蒙古行业用水定额^[4])。

不同煤炭生产和火力发电技术的用水效率差异很大。为确定单产水足迹计算所需的关键参数,准确估算九大煤电基地煤炭生产和火力发电的用水量,调研了九个煤电基地利用不同冷却技术的煤炭企业和火电厂。其中,接受调查的 480 个煤炭企业 2015 年原煤产量为 $12 \times 10^8 t$, 占 9 个煤电基地煤炭总产量的 54%。另外,接受调查的 170 家火电厂和公司,其总发电量高达 $4200 \times 10^8 kW \cdot h$, 占 9 个能源基地总发电量的 74.3%。因此,选取样本较好代表 9 个能源基地的煤炭和火力发电行业的水平用于分析。

3 结果与分析

3.1 九大煤电基地煤炭水足迹

根据煤电基地的煤炭产量和火力发电量及单产水足迹等得出九大煤电基地 2006~2015 年煤炭和煤电水足迹的变化,本文仅列出了锡林郭勒煤电基地和鄂尔多斯煤电基地在煤炭总产量、洗煤量、发电量、单产水足迹和总水足迹的变化情况,见图 2。

由图 2 可看出,鄂尔多斯煤电基地和锡林郭勒煤电基地煤炭生产总量分别从 2006 年的

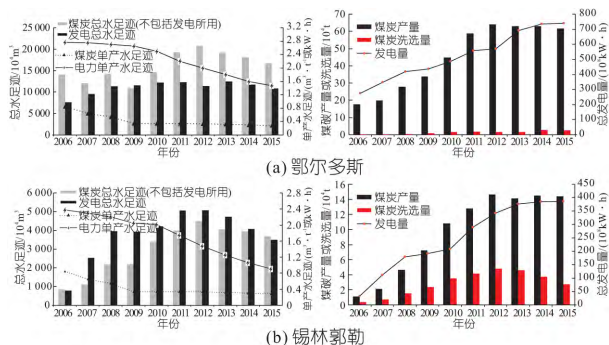


图 2 2006~2015 年内蒙古煤电基地能源产量和水足迹
Fig.2 Energy production and associated water footprint of the Inner Mongolia Coal Bases from 2006 to 2015

1.76×10⁸、1.12×10⁷t 增加到 2015 年的 6.16×10⁸、1.44×10⁸t, 发电总量分别从 2006 年的 2.75×10¹⁰、3.27×10⁹kW·h 增加到 2015 年的 7.38×10¹⁰、3.85×10¹⁰kW·h。与急剧增加的煤炭和电力生产量相比,鄂尔多斯能源基地和锡林郭勒能源基地煤炭和电力的总水足迹均呈现“先升后降”的趋势,根据调研结果,2011 年之前,技术进步的程 度不及产量上升的程 度,导致总水足迹仍呈现上升趋势,2011 年之后,产量不断增加但由于技术的大幅度进步,总水足迹呈现下降趋势。

陕北煤电基地和宁东煤电基地的总煤炭产量分别从 2006 年的 1.28×10⁸、1.60×10⁷t 增加到 2015 年的 4.17×10⁸、6.83×10⁷t,总发电量分别从 2006 年的 1.6×10¹⁰、6.4×10⁹kW·h 增加到 2015 年的 8.1×10¹⁰、5.5×10¹⁰kW·h。随着煤炭和电力生产的急剧增加,陕北能源基地的煤电总水足迹呈现出先升后降的趋势,而宁东煤电基地的总水足迹却呈现出急剧上升的趋势,这主要是由于该能源基地快速发展所带来的用水需求的增加抵消了用水效率的提高。

哈密煤电基地和准东煤电基地的总煤炭产量分别从 2006 年的 5.7×10⁶、5.1×10⁶t 增加到 2015 年的 2.3×10⁷t、6.5×10⁷t,总发电量分别从 2006 年的 1.5×10⁹、4.9×10⁹kW·h 增加到 2015 年的 2.6×10¹⁰、6.9×10¹⁰kW·h。2010 年以后,煤炭和电力生产的增长速度大幅提高,这意味着新疆能源基地在未来几年将为保障中国能源安全发挥重要作用。在用水量方面,煤炭的总水足迹呈现出“先升后降”的趋势,但在过去的 10 年中,电力的总耗水量一直在增加,表明这两个煤电基地是以火力发电为主,而非煤炭生产。

晋北煤电基地、晋中煤电基地和晋东煤电基地的煤炭总产量分别从 2006 年的 1.87×10⁸、1.77×10⁸、1.9×10⁸t 增加到 2015 年的 3.66×10⁸、3.0×10⁸、2.74×10⁸t,总发电量分别从 2006

年的 5.2×10¹⁰、4.0×10¹⁰、3.7×10¹⁰kW·h 增加到 2015 年的 8.8×10¹⁰、7.7×10¹⁰、6.0×10¹⁰kW·h。这三个能源基地的煤炭和电力生产在过去 10 年中保持了中等速度的增长,“十二五”期间由于现代化采煤节水技术的发展及煤炭企业管理水平的提高,煤炭和电力总水足迹不断减少。

综上可知,2006~2015 年,九大煤电基地煤炭总产量和燃煤发电量分别为 2.07×10¹⁰t 和 4.12×10¹²kW·h,年均发电量分别达 2.07×10⁹t 和 4.12×10¹¹kW·h,分别占全国煤炭年产量的 61.4%和火电发电量的 11.9%。同时,煤炭和煤电的年均总水足迹为 13.4×10⁸m³,占九个煤电基地淡水可用水资源总量的 22.8%。能源产量上升,单产水足迹降低,大部分煤电基地的水足迹减小。

3.2 虚拟水流动伴生的水资源压力

九大煤电基地是我国重要的煤炭来源,大量的虚拟水内嵌于煤炭和电力从煤炭基地流向全国各地。2006~2015 年间九大煤电基地虚拟水流出量的变化趋势见图 3。由图 3 可看出,2006 年,九个煤电基地的总虚拟水流出量为 7.56×10⁸m³,占 9 个基地煤电总水足迹的 71.6%。2015 年,虚拟水流出量为 9.57×10⁸m³,占 9 个基地煤电总水足迹的 81.2%。

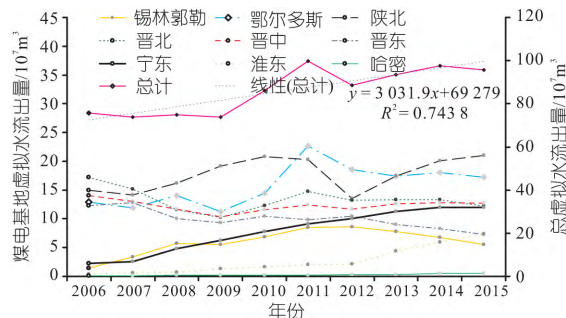


图 3 煤电基地虚拟水流量的变化趋势
Fig.3 The changing trend of virtual water flow in the energy bases

近年来,我国经济社会的飞速发展,带动了能源需求量的增加,煤电基地生产规模迅速扩张,伴随煤炭调运和电力输送流向全国各地的虚拟水量不断上升,大大增加了九大煤电基地用水不可持续的风险。煤电基地的 M_{WSI} 总体上呈现上升趋势。图 4 为 2006~2015 年九大煤电基地虚拟水流出伴生的水资源压力。

由图 4 可看出,哈密煤电基地由于生产规模较小,其水资源压力处于无压力等级,当地现有的水资源条件可支撑煤电基地的不断发展。2014 年以前,宁东煤电基地的水资源压力等级处于无

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
哈密	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
宁东	N	N	N	N	N	N	N	N	S	S
晋东	S	S	S	S	S	S	S	N	N	N
准东	N	N	N	N	N	N	N	S	S	M
晋中	S	S	S	M	S	S	S	S	M	M
晋北	M	M	M	M	M	M	S	S	M	M
陕北	M	M	M	M	M	M	S	M	M	M
鄂尔多斯	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M
锡林郭勒	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M

N S M E
 无压力 轻度压力 中度压力 重度压力

图 4 九大煤电基地虚拟水流出伴生的水资源压力

Fig.4 The water stress induced by virtual water flow in the nine energy bases

压力,但近两年上升为轻度压力,应注意煤电基地扩张速度,以免危及当地水资源安全。晋东煤电基地的水资源压力近 3 年降至无压力,主要原因是单产水足迹的降低,目前水资源足以支撑煤电基地的发展。准东煤电基地由于近几年的飞速扩张,水资源压力从无压力已经上升至中度压力等级,给当地用水安全带来了巨大的风险,国家有关部门和当地政府应尽快调整发展战略,调整煤炭企业布局或者新建调水工程,否则当地的水资源可持续性将难以维系。晋北和晋中煤电基地近两年由于煤电基地的不断扩张,两个煤电基地的水资源压力均上升至中度压力,煤电基地的发展给当地水资源安全带来威胁。山西是目前我国最主要的动力煤来源地,是我国能源安全、社会稳定和经济发展的保障,晋北和晋中煤电基地应向晋东煤电基地汲取经验,不断推动现代化大型煤电基地的建设,提高用水效率,维系当地水资源能源友好发展。陕北、鄂尔多斯和锡林郭勒煤炭基地的水资源压力一直持续在较高的等级,能源产业发展需水和当地的供水能力严重不匹配,应该尽快制定能源的适水发展战略,采取相应措施提高用水效率和能源生产效率。

3.3 2020 年煤电基地发展的水资源适配性评估

九大煤电基地 2020 年的水资源供需情况见图 5。由图 5 可看出,2020 年九大煤电基地的水足迹均超过 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中,宁东、陕北和鄂尔多斯三个煤电基地的水足迹超过 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$,分别为 2.00×10^8 、 2.64×10^8 、 $2.65 \times 10^8 \text{ m}^3$,根据预测 2020 年九大煤电基地总水足迹为 $15.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

通过红线控制法得到区域可供给煤电基地的水资源量为 $11.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,并得到供水量和水足迹的关系,只有准东和晋北煤电基地的水资源满足未来基地扩张需要,其余七个煤电基地水资源均无法支撑煤电基地的发展。另外,除晋中煤电基地外,其他六个煤电基地的水资源供需缺口均

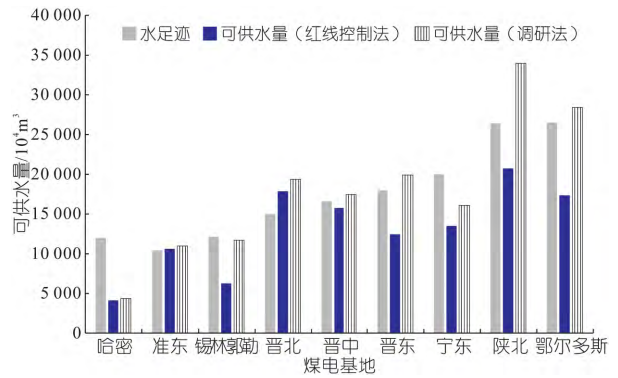


图 5 2020 年煤电基地水资源供需情况

Fig.5 Supply and demand of water resources at coal base in 2020

超过 $5\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$,特别是鄂尔多斯煤电基地,供需缺口已超过 $9\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$,水资源和能源严重不匹配。

从调研法的结果可看出,晋中、晋东、陕北和鄂尔多斯煤电基地通过现有工程设施的挖潜配套与优化调度,通过一系列措施提高区域可供给煤电基地的水量后,满足了煤炭基地生产的水资源需求。但哈密、宁东和锡林郭勒煤电基地实施一系列措施后,其水资源供给依然无法满足生产所需。锡林郭勒的供需缺口较小,为 $445.89 \times 10^4 \text{ m}^3$,建议适当调整水资源规划,以保证煤电基地用水的可持续性。哈密和宁东煤电基地发展的水资源严重不匹配,应尽快调整发展战略,限制煤电基地的扩张甚至缩减现有生产规模,保障煤电基地的用水安全。

4 结论

a. 能源产量不断上升,煤电基地水足迹不断增大,但由于单产水足迹的降低,晋北、晋中和晋东煤电基地的水足迹则呈现逐渐减小的趋势,且伴随着煤炭和电力的虚拟水流出量不断增多。

b. 部分基地能源生产需水与当地供水能力不匹配,面临较大缺口。

c. 煤电基地用水需求保障面临严峻的挑战,今后应严格遵守“以水定产、以水定地”的发展原则,不断提高水资源利用效率,挖掘煤炭行业节水潜能,提高非常规水利用技术水平,扩大煤电基地用水水源范围。

参考文献:

[1] 姜珊,赵勇,尚毅梓,等.中国煤炭基地水与能源协同发展评估[J].水电能源科学,2016,34(11):40-43.
 [2] Yang D, Liu J, Yang J, et al. Life-cycle Assessment of China's Multi-crystalline Silicon Photovoltaic Modules Considering International Trade [J].

Journal of Cleaner Production, 2015, 94(1):35-45.

scale Water Resources Assessments[J],2004.

[3] Smakhtin V, Revenga C, Doll P. Taking Into Account Environmental Water Requirements in Global-

[4] DB15/T385-2009,内蒙古自治区行业用水定额标准[S].北京:人民交通出版社,2009.

Analysis of Water Resources Stress Associated with the Development of Major Coal Bases in North of China

CHEN Qian-yun^a, AN Ting-li^a, WANG Yu-bao^a, HAN Xin-xue-qi^a, GAO Xue-rui^b

(a. College of Water Resources and Architectural Engineering; b. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In view of the rapid expansion of the coal-fired power bases, it will bring great pressure to the regional water resources security. The life cycle assessment method was used to calculate the water footprint of coal production and thermal power generation in the nine major coal-fired power bases in northern China from 2006 to 2015. A Modified Water Stress Index induced by coal and electricity transfer was proposed to evaluate the pressure on the local water resources system caused by the virtual water flowing out of water-scarce areas due to coal and electricity transfer. And then the water resource adaptability of the future coal-fired bases development was analyzed. The results show that the annual average water footprint of coal production and thermal power generation at nine major coal bases reaches 1.34 billion m³, the total virtual water flowing out of the nine coal bases embedded in energy product trade is keeping increasing with the growth rate of 3.031 9×10⁷ m³/a; in the past 10 years, the Modified Water Stress Index of coal bases appears an obvious upward trend; The total water footprint of nine coal bases reaches 1.57 billion m³ in 2020, water resources available to the coal bases in the region will be 1.19 billion m³. Only the water resources of the Northern Shanxi and East Junggar coal bases will meet future expansion needs of the base. The East Shanxi, Middle Shanxi, Northern Shaanxi and Erdos coal bases can increase the water supply capacity by optimizing the dispatch to meet the production needs of coal bases. The development of Kumul and Eastern Ningxia is seriously unsuitable for water resources. The development strategy should be adjusted to guarantee water safety of the coal-fired power bases.

Key words: coal bases; water footprint; virtual water; life cycle; water stress index



(上接第 42 页)

Selection and Application of Water Quality Evaluation Method in Three Gorges Reservoir Area and Its Tributaries

YUAN Jing¹, WANG Jin-cheng², QIAN Bao²

(1. Middle Changjiang River Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Wuhan 430012, China; 2. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to solve the problem of lack of unified evaluation criteria for water quality evaluation of river-type reservoirs, this paper introduced the concept of sectional storage capacity based on the hydrological data of six complete hydrological years after 175 m water storage in the Three Gorges reservoir area. The hydraulic retention time was calculated according to the inbound/outbound flow and the water level of the reservoir corresponding to the storage capacity. The flow velocity of each section was calculated according to the measured flow rate of each section and the measured large section area data. The key hydrodynamic factors such as the cumulative hydrodynamic retention time and flow velocity were used as the index to analyze the longitudinal quantitative division of the river-type reservoir water quality assessment standard. The results show that there are obvious spatial and temporal differences in the hydrological conditions of the Three Gorges Reservoir. During the flood season, the whole river section should be evaluated according to river standards; In the dry season, the sections above the Wanxian County should be evaluated according to river standards, and Wanxian to Dam should be evaluated according to lake standards. The tributary Kuwan should be evaluated according to lake standards. Research results can provide technical support for water protection work.

Key words: Three Gorges Reservoir; water quality evaluation standard; segment capacity; quantified partitioning; hydraulic retention time; flow rate



《水电能源科学》2019 年第 37 卷第 5 期勘误表

页码	位置	详 情	
115	脚注	误	作者简介: 湖北省自然科学基金项目(2014CFB670);湖北省建设科技计划项目(KJ2016QT012) 通讯作者: 陈瑞(1988-),女,硕士,研究方向为施工组织管理,E-mail:382067927@qq.com
		正	基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2014CFB670);湖北省建设科技计划项目(KJ2016QT012) 作者简介: 陈瑞(1988-),女,硕士,研究方向为施工组织管理,E-mail:382067927@qq.com