

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.06.24

松花江流域主要干支流纵向连通性与鱼类生境

吕军,汪雪格,刘伟,王彦梅,魏春风,吴计生

(松辽流域水资源保护局松辽水环境科学研究所,吉林长春 130026)

摘要:基于松花江流域拦河建筑物现状,采用阻隔系数法,评价主要干支流的纵向连通性。结果表明:松花江干流和嫩江纵向连通性指数分别为0.21和0.27,连通性评价等级为良,第二松花江连通性指数为0.62,连通性评价等级为中等。嫩江支流中连通性最好的是嫩江,成为冷水性鱼与嫩江尼尔基以下河段交流的唯一通道;而甘河、雅鲁河、绰尔河和讷谟儿河连通性评价等级为良,洮儿河、霍林河和乌裕尔河连通性评价等级为劣。第二松花江支流中伊通河和饮马河拦河坝众多,鱼类洄游受阻,连通性等级为劣。松花江干流支流牡丹江、拉林河受梯级水电站开发影响,其评价指数为劣;倭肯河、汤旺河受河流沿岸灌区渠首闸坝、水库及水电站建设影响,评价等级为差,这些支流目前濒危珍稀鱼类已绝迹,也极少见到冷水性鱼类。整个流域内未建设过鱼设施,对鱼类洄游和种群交流产生阻隔,提出了补建和新建过鱼设施,必要时开展增殖放流的措施。建议对没有预留生态流量的拦河建筑物进行改造或者利用现有设施泄放生态流量,对预留生态流量的调整水库调度方案保证其下泄流量满足不同时间、空间鱼类生存需求。

关键词:河流;纵向连通性;鱼类生境;阻隔系数法;松花江流域

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2017)06-0155-06

Longitudinal connectivity and fish habitat of main tributaries in Songhuajiang River Basin

LYU Jun, WANG Xuege, LIU Wei, WANG Yanmei, WEI Chunfeng, WU Jisheng

(Songliao Institute of Water Environmental Science, Songliao River Basin Water Resources
Protection Bureau, Changchun 130026, China)

Abstract:Based on the current situation of the river blocking structures in the Songhua River basin, the barrier coefficient method is used to evaluate the longitudinal connectivity of the main tributaries. The results show that the longitudinal connectivity indices of the Songhua River and Nenjiang are 0.21 and 0.27 respectively, the connectivity grade is good. The connectivity index of the second Songhua River is 0.62, and the connectivity level is medium. The best connectivity among the Nenjiang tributaries is Nenjiang, which is the only passageway for cold water fish to interflow with the lower reaches of Nierji, Nenjiang. The connectivity of the Gan River, Yalu River, Chuoer River and Nemo River connectivity level is good, and the same of the Taoer River, Huolin River and Wu Yuer River is inferior. Yitong River and Yinma River of the second Songhua River tributary have numerous dams, fish migration is blocked, their connectivity level is inferior. Mudanjiang, Lalin River of Songhua River tributaries are influenced by the development of cascade hydropower stations, their evaluation index is bad; Wukan River, Tangwang River, affected by the construction of dam gates, reservoirs and hydropower stations along the river

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201401014)
作者简介:吕军(1964—),女,教授级高级工程师,主要从事水资源保护研究。E-mail:752726319@qq.com
通信作者:汪雪格,高级工程师,博士。E-mail:m13504314997@163.com

irrigation area, evaluation grade for them is poor. At present, the endangered rare fish in these tributaries have been extinct, cold water fish are rarely seen. Fish pass structures are not built in the whole basin, which blocks fish migration and population exchange. Such measures as to make up and build fish pass structures and carry out the proliferation and release of fish if necessary are proposed in this paper. The river structures without reserved ecological flow are to be reconstructed or the ecological flow is discharged by using the existing facilities. For those river structures with reserved ecological flow, reservoir regulation scheme shall be adjusted to ensure that the discharged volume will meet fish survival needs at different times and in different spaces.

Key words: river; longitudinal connectivity; fish habitat; barrier coefficient method; Songhuajiang River Basin

松花江流域水系发育,河流、湖泊、水库、沼泽众多,水域广阔,生态系统类型复杂,水生生物资源和生物多样性极为丰富,有北方冷水性鱼类,还有列入《中国濒危动物红皮书》(1990 年)的日本七鳃鳗、雷氏七鳃鳗、达氏鲢、施氏鲟、哲罗鱼、细鳞鲑、怀头鲮、乌苏里白鲑等^[1]。然而,目前一些鱼类自然分布区域逐渐缩小,种群下降,濒危程度加剧。如施氏鲟,据记载,在松花江干流都有分布,上游在三岔河也有分布,现今只在松花江中下游偶尔出现;大马哈鱼 20 世纪五六十年代可以洄游到松花江中上游,目前仅上溯到同江段。哲罗鱼、细鳞鲑、怀头鲮、黑龙江茴鱼等鱼类现如今只分布在松花江流域支流的上游区域,中下游及干流很少出现。

影响鱼类分布和资源量的因素很多,包括水库大坝的阻隔、鱼类捕捞、水质污染、生态环境变化等。其中,水利工程的阻隔是导致鱼类生境萎缩、资源量下降的重要原因。水利工程的阻隔,导致河流纵向连接不畅通甚至不连通,使得一些洄游性的鱼类无法跨越大坝洄游至上游完成其生活史。目前,关于水库大坝等水利工程对鱼类洄游的阻隔研究仅停留在单一工程、定性的描述,很少有累积、定量的研究与评价,如何定量评价水利工程对鱼类洄游产生的影响成为水利、水环境和水生态研究的重点和难点。

河湖水系连通是新时期治水新方略,相关理论技术研究正处于探索阶段^[2-13]。总结相关研究,本文将河湖水系连通性在空间层面分为纵向连通性、横向连通性和垂向连通性。纵向连通性不仅包括水流的连续性,还包括生物学过程的连续性。纵向连通性受到两种因素的影响:①连通河段的长度,如连通河段足够长,能满足鱼类生存所需的生境,则河流的纵向连通性较好;②河湖连通的质量,不同的拦河建筑物对河道的阻隔时间和程度不同,对水文情势的改变不同,对连通性影响不同。

本文从流域河流层面,采用阻隔系数法,评价河

流纵向连通性,进而揭示水利工程对鱼类洄游通道的累积影响程度,以期水利发展、水环境健康和水生态平衡提供技术支撑。

1 数据与方法

1.1 松花江流域水利工程建设情况

松花江流域位于我国的东北部,是我国七大流域之一。流域水利水电工程开发较晚,日伪时期(20 世纪三四十年代)在第二松花江中游修建了小丰满水电站,第一次把第二松花江分成上下两段。1949 年后随着社会经济的发展,人工修建了大量的水库、闸坝、堤防、渠系与灌区等水利工程^[14],这些水利工程和自然演进过程中形成的江河、湖泊、湿地等水体构建了新的水力联系。松花江流域主要干支流河流长度及水利工程统计见表 1。

目前,松花江流域内的水库数量由 20 世纪 50 年代的 30 座增加到 2 356 座,水库的总库容也由 112 亿 m³增加至 518 亿 m³(图 1),整个流域 1990—2010 年水库总库容增长迅速。松花江流域内共有水电站(非水库型水电站)为 132 座,装机容量共计 4 662 万 kW。流域内为了灌溉以及城市段景观用水,建设了橡胶坝、节制闸等拦水工程,共计 662 个。这些闸坝雍高水位,形成水位落差,对鱼类洄游造成阻隔,对上下游鱼类的交流产生不利影响。

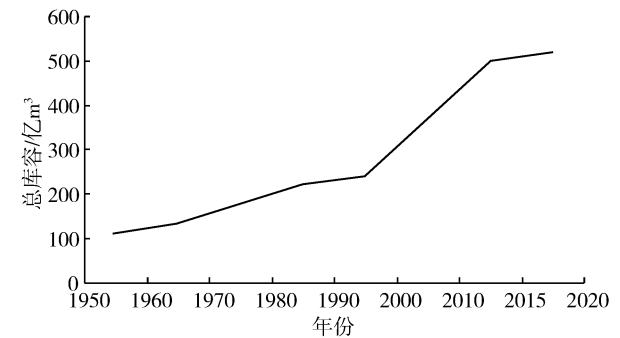


图 1 松花江流域水库库容增长曲线

表 1 松花江流域主要干支流河流长度及水利工程统计

流域	河流	河长/km	灌溉拦河坝	城市段景观拦河坝	水电站	水库
嫩 江	嫩 江	1 370	北部引嫩渠首坝	3 个城市拦河坝		尼尔基水库
	甘 河	446		甘河橡胶坝		
	诺敏河	467	查哈阳灌区渠首泄洪闸			
	雅鲁河	398	古里金灌区节制闸、 成吉思汗红光灌区 节制闸		龙宝发电站	
	绰尔河	576				绰勒水库
	洮儿河	553	巴达仍贵枢纽节制闸、 义勒力特节制闸			察尔森水库
	霍林河	590		霍林郭勒市城 区段防洪工程 1~9 号橡胶坝		
	讷谟尔河	688	讷全渠首拦河闸、 红太渠首拦河闸			山口水库
	乌裕尔河	587	灌区渠首橡胶坝、 依安县乌裕尔河 拦河闸			红卫水库、东升水库
第 二 松 花 江	第二松花江	958			龙城水电站	红石水库、白山水库、红石水 库、丰满水库、哈达山水库
	伊通河	342	范家灌区管理所 拦河闸、寿山水库 灌区向前拦河闸	马哨口拦河闸、小 板桥橡胶坝、自由 拦河闸、兴华拦河 闸、四化拦河闸		新立城水库
	饮马河 (不含伊通河)	386	灌区 7 个橡胶坝， 九台市太平桥橡 胶坝			黄河水库、石头口门水库
	辉发河	289	季家拦河闸、海龙 橡胶坝、湾龙橡胶 坝、合胜橡胶坝、 团结橡胶坝、黑山 头橡胶坝、永胜橡 胶坝			
松 花 江 干 流	松花江	939		哈尔滨城区坝 2 个	大顶子山水电站	
	呼兰河	523			河口水电站	
	拉林河	244	金马干渠橡胶坝		向阳水电站、 小河里水电站	磨盘山水库、龙凤山水库
	蚂蚁河	341	方正县灌区 渠首溢流坝	尚志市蚂蚁河 橡胶坝		
	牡丹江	726	大湾拦河闸	敦化市 2 个 橡胶坝	丹江水电站、黑石二级水 电站、黑石三级水电站、 镜泊湖新厂发电站、镜泊 湖老厂发电站、阿堡电 站、红卫发电站、红农发 电站、渤海发电站、石头 电站、牡丹江市三间房水 电站、晨光发电厂	上石水库、上沟水库、红石水 库、西崴子水库、黑石水库、 莲花水库
	倭肯河	450	倭肯渠首闸、解放 坝泄洪闸、大鲜拦 河闸、龙梦闸			凤凰山水库、安兴水库、桃山 水库
	汤旺河	509	永久节制闸	前进社区橡胶坝	庆丰电站、永久水电站、 小云峰水电站	

1.2 松花江流域保护性鱼类习性、特点

历史上松花江流域鱼类种类繁多,上游以出产名贵的冷水性鱼类著名,下游有经济价值很高的大马哈鱼和日本七鳃鳗洄游,鲤科等鱼类在松花江流域生长迅速,大量出产在中游各地。

松花江流域冷水性鱼类多种多样,有 10 科 16 属 19 种,占松花江水系鱼类总种数的 30.65%^[17]。其中有溯河洄游型的大马哈鱼和日本七鳃鳗,有经济价值的冷水性鱼类有大马哈鱼、黑斑狗鱼、江鲑、银鱼、池沼公鱼、乌苏里白鲑、哲罗鱼、雅罗鱼等 8 种。属于我国珍稀种的有大马哈鱼、江鲑、乌苏里白鲑、日本七鳃鳗等 4 种。

冷水性鱼类多生活在上游的山涧溪流、湖泊和海拔较高的地区,可以在水温很低的水体中生长发育。随生活水域环境温度变化,有明显的季节性迁徙,在江河的深水区越冬,初春结冻时即上溯洄游。不同的冷水鱼的产卵期不同,分布在全年的各月。

大马哈鱼在秋季沿黑龙江溯河上游至松花江流域产卵,受精卵在冰下低温水域孵化,翌年 2—3 月孵出,至 5 月开始降海洄游,然后远海栖息生活 3~5 年达性成熟时溯河,回归原繁殖河流产卵。日本七鳃鳗从鱼卵到幼鱼开始在松花江生活四五年后变态下海,在海洋中生活 2 年后,秋季由海洋进入江河,在江河下游越冬,翌年 5—6 月溯至上游产卵繁殖。

中游分布有产黏性卵和产漂流性卵的鱼类,具有江湖半洄游性,一般生活在江河、湖泊等水域,性成熟个体在江河流水中产卵,冬季则在干流或湖泊的深水处越冬。产卵一般在 4—7 月。产黏性卵和漂流性卵的鱼类产卵均需一定流速的水流刺激。而对于产漂流性卵的鱼类,鱼苗的孵化过程需要一定的水流速度,如草鱼等,其漂流距离需达几十千米才能孵化成鱼苗。但是当流速减小到一定程度后,鱼卵便会沉到江底腐烂,不能孵化成鱼苗。

1.3 研究方法

河流纵向连通性受到连通河段长度和阻隔程度的影响。连通河段长度越长对鱼类等水生生物的生存越有利,阻隔程度越小对鱼类的洄游、迁徙越有利。因此,采用阻隔系数法计算单位长度河道所受的完全阻隔系数,系数越大表明阻隔越大,系数越小表明阻隔越小,越适合鱼类生存。其数学表达式可以表述为

$$C_j = \frac{\sum_{i=1}^n N_i a_i}{L_j} \times 100 \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (1)$$

式中: C_j 为第 j 段河流的纵向连通性指数; n 为拦河坝的种类数量; N_i 为第 i 种拦河坝的数量; a_i 为第 i 种的拦河坝(城市段滚水坝、水库、水电站、渠首坝等)对应的阻隔系数; L_j 为河流的长度。

闸坝等水利工程对鱼类的影响主要表现在两个方面,一是改变水文情势,二是对鱼类洄游产生阻隔。水文情势变化包括流量、流速、洪水出现时间等的变化,这些对于鱼类生境会产生很大的影响。当流速降到很低时鱼类无法产卵,漂流性卵的孵化需要一定的距离,当闸坝太多时,两坝之间距离过短,鱼类还未孵化就进入库区,因库区流速太小而使鱼卵沉底,无法孵化。

不同的拦河建筑物对鱼类的阻隔程度、时间不同,相应的对鱼类洄游造成的影响也不同。水库、水电站由于高坝的建设,如果没有建设过鱼设施,会阻隔所有鱼类的洄游,例如松花江干流上大顶子山水库与水电站的建成,对大马哈鱼和日本七鳃鳗的洄游造成了严重的阻隔,完全切断了大马哈鱼和日本七鳃鳗洄游至大顶子山大坝以上产卵场的洄游通道;嫩江的尼尔基水库的建设,几乎完全阻断了嫩江上游冷水性鱼与嫩江干流之间的交流,上游的冷水性鱼只能到达尼尔基水库越冬,而尼尔基水库以下的冷水性鱼因水库大坝的阻隔无法洄游至上游冷水区生长繁殖,冷水性鱼类因下游温度高而无法生存,导致冷水性鱼的生境缩小。松嫩平原是我国的主要农业产区,灌区众多,拦河取水的现象很多,一般为橡胶坝,坝顶可以溢流,并可根据需要调节坝顶,控制上游水位。灌区取水基本只是在 5—9 月份,而其他月份通过放气或放水等将坝顶调低,河流基本连通;而且灌区拦河坝的高度较低,一些大型的鱼类可以越过拦河坝进入上游完成生活史。一些城市段的景观拦河坝,为了城市的景观全年拦河,但是其坝顶较低,某些大型鱼类可以跳跃过去。另外,有一些拦河坝也建设了鱼梯、鱼道等过鱼设施,可以保证一些鱼类洄游。基于以上分析,确定闸坝阻隔系数 a_i 取值(表 2)。

表 2 闸坝阻隔系数取值

拦河坝类型	对鱼类洄游通道阻隔特征	阻隔系数
灌区拦河坝	5—9 月,只对部分鱼类洄游造成阻隔	0.25
城市段景观拦河坝	全年,只对部分鱼类洄游造成阻隔	0.5
水电站	完全阻隔	1
	有洄游通道,部分阻隔	0.5
水 库	完全阻隔	1
	有洄游通道,部分阻隔	0.5

已建丰满、白山、红石、新立城、石头口门等多项大中型水库、水电站工程,河流纵向连通性总体较差。尤其在支流伊通河和饮马河,因灌区拦河坝、城市滚水坝、橡胶坝、拦河闸等建设,造成河流渠化、片断化明显,鱼类洄游受阻,河道纵向连通性受到严重破坏。历史上,第二松花江流域河流鱼类多为产漂流性卵的鱼类。对于产漂浮性卵的鱼类来说,鱼类繁殖需要一定的水流速度。如草鱼,其漂流性卵需要在江面上漂浮几十公里才能孵化成鱼苗。但是当流速减小到一定程度后,鱼卵便会沉到江底腐烂,不能孵化成鱼苗。第二松花江由于丰满、白山、红石水库及哈达山大坝的阻隔导致流速降低,鱼卵漂流时间过短,青鱼等的天然产量已大为减少,青鱼、草鱼、鲢等产漂流性卵鱼类的产卵场消失。

e. 松花江干流河流较长,目前,干流上除大顶子山航电枢纽、哈尔滨市城区滚水坝外,尚未有其他拦河设施,河流纵向连通性尚可。但是由于大顶子山航电枢纽的建设,给鱼类资源带来了极大的影响,严重破坏了鱼类的生长、繁殖、育肥、洄游环境,阻断了鱼类洄游通道;阻断了鲢鱼产卵群体由下游向位于松花江上游肇源、洮洲鲢鱼的产卵场繁殖的洄游通道,使洮洲江段鲢鱼的产卵场失去其生态功能;阻断了大马哈鱼、日本七鳃鳗等鱼类洄游通道,使得大马哈鱼、日本七鳃鳗等在大顶子山水电站上游基本消失。支流牡丹江、拉林河受梯级水电站开发影响,河流纵向连通性受阻严重,其评价等级为劣。支流倭肯河、汤旺河受河流沿岸灌区渠首闸坝、水库及水电站建设影响,纵向连通性处于较差状态。这些支流目前濒危珍稀鱼类已绝迹,也极少见到冷水性鱼类。

f. 松花江流域内共有 2386 座水库,132 座水电站,其中干流和主要一级支流上有水库 25 座、水电站 21 座,显然,绝大多数的水库、水电站分布于二级及以上支流中。因此,二级及以上支流受阻隔程度更高,河湖连通性更差。河湖连通性优劣顺序为:干流、一级支流、二级及以上支流。

3 结 语

本文采用阻隔系数法较准确、系统地 from 流域层面评价了松花江流域主要干支流的纵向连通性及对鱼类生境的影响。该方法不仅简单、快捷,还能够宏观、定量评价水库大坝等拦河建筑物对鱼类洄游通道累积的环境影响。评价结果简便可靠,可为水利规划、水环境治理和水生态恢复措施的制定提供技术支撑和决策依据,具有实际使用价值。

参考文献:

[1] 向莹,韦安磊,茹彤,等. 中国河湖水系连通与区域生态环境影响[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(5):139-142. (XIANG Ying, WEI Anlei, RU Tong, et al. Rivers system connection and regional ecological and environmental impacts in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2015,25(5):139-142. (in Chinese))

[2] 董春雨,薛永红. 从系统论的观点看我国河湖水系连通工程的得失[J]. 自然辩证法研究,2014,30(11):38-45. (DONG Chunyu, XUE Yonghong. Gain and loss in interconnected river system theory [J]. Studies in Dialectics of Nature,2014,30(11):38-45. (in Chinese))

[3] 陈星,许伟,李昆朋,等. 基于图论的平原河网区水系连通性评价:以常熟市燕泾圩为例[J]. 水资源保护,2016,32(2):26-29. (CHEN Xing, XU Wei, LI Kunpeng, et al. Evaluation of plain river network connectivity based on graph theory: a case study of Yanjingwei in Changshu City[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2):26-29. (in Chinese))

[4] 田传冲,陈星,湛忠宇,等. 水量水质系统控制的流域水系连通方案[J]. 水资源保护,2016,32(2):30-34. (TIAN Chuanchong, CHEN Xing, ZHAN Zhongyu, et al. Watershed system connectivity scheme based on water quantity and quality control system[J]. Water Resources Protection,2016,32(2):30-34. (in Chinese))

[5] 王中根,李宗礼,刘昌明,等. 河湖水系连通的理论探讨[J]. 自然资源学报,2011,26(3):523-529. (WANG Zhonggen, LI Zongming, LIU Changming, et al. Discussion on water cycle mechanism of interconnected river system network[J]. Journal of Natural Resources,2011,26(3):523-529. (in Chinese))

[6] 施勇,栾震宇,陈炼钢,等. 长江中下游江湖关系演变趋势数值模拟[J]. 水科学进展,2011,21(6):832-839. (SHI Yong, LUAN Zhenyu, CHEN Liangang, et al. Numerical study of the evolution trend in the river-lake relationship in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Advances in Water Science,2010,21(6):832-839. (in Chinese))

[7] 李原园,酆建强,李宗礼,等. 河湖水系连通研究的若干问题与挑战[J]. 资源科学,2011,33(3):386-39 (LI Yuanyuan, LI Jianqiang, LI Zongli, et al. Issues and challenges for the study of the interconnected river system network[J]. Resources Science, 2011, 33(3):386-391. (in Chinese))

[8] 崔国韬,左其亭,李宗礼,等. 河湖水系连通功能及适应性分析[J]. 水电能源科学,2012(2):1-5. (CUI Guotao, ZUO Qiting, LI Zongli, et al. Analysis of function and adaptability for interconnected river system network[J]. Water Resources and Power,2012(2):1-5. (in Chinese))

(下转第 174 页)

- of constructed wetland in Fenhe River ecological rehabilitation and sewage treatment[J]. Shanxi Water Resources,2012(1):28-32. (in Chinese))
- [5] 孙从军,张明旭. 河道曝气技术在河流污染治理中的应用[J]. 环境保护,2001(4):12-14,20. (SUN Congjun, ZHANG Mingxu. Application of aeration technique in river pollution control[J]. Environmental Protection,2001(4):12-14,20. (in Chinese))
- [6] 高慧琴,刘凌,闫峰,等. 底泥疏浚对湖泊内源磷释放的短期效应研究[J]. 水资源保护,2011,27(3):33-37. (GAO Huiqin, LIU Lin, YAN Feng, et al. Short-term effect of sediment dredging on endogenous phosphorus release [J]. Water Resources Protection,2011,27(3):33-37. (in Chinese))
- [7] 吴霞,谢悦波. 直接投菌法在城市重污染河流治理中的应用研究[J]. 环境工程学报,2014(8):3331-3336. (WU Xia, XIE Yuebo. Application of directly adding microbial agent to improve water quality of heavily polluted urban river[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2014(8):3331-3336. (in Chinese))
- [8] 黄民生,徐亚同,戚仁海. 苏州河污染支流:绥宁河生物修复试验研究[J]. 上海环境科学,2003(6):384-388. (HUANG Minsheng, XU Yatong, QI Renhai. Insitu bioremediation of seriously polluted Sui-ning Creek[J]. Shanghai Environmental Sciences,2003(6):384-388. (in Chinese))
- [9] 魏源送,郑嘉熹,王光宇,等. 地表水微生物溯源技术的开发和应用进展[J]. 水资源保护,2016,32(1):1-11. (WEI Yuansong, ZHENG Jiayi, WANG Guangyu, et al. Development and application progress of microbial source tracking in surface water[J]. Water Resources Protection, 2016,32(1):1-11. (in Chinese))
- [10] 杨柳燕,王楚楚,孙旭,等. 淡水湖泊微生物硝化反硝化过程与影响因素研究[J]. 水资源保护,2016,32(1):12-22. (YANG Liuyan, WANG Chuchu, SUN Xu, et al. Study on microbial nitrification and denitrification processes and influence factors in freshwater lakes [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (1): 12-22. (in Chinese))
- [11] 燕文明,刘凌,赵倩维,等. 小型浅水湖泊表层沉积物氨氧化古菌群落结构特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):449-453. (YAN Wenming, LIU Ling, ZHAO Qianwei, et al. Characteristics of community structure of AOA in surface sediments of small shallow lakes [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(5):449-453. (in Chinese))
- [12] 刘正辉. 东江氨氮污染河段的微生物群落特征[D]. 广州:华南理工大学,2011.
- [13] 谭旭. 茅台地区赤水河水体微生物多样性分析[D]. 北京:北京化工大学,2014.
- [14] 丁怡,王玮,王宇晖,等. DO 和碳源在人工湿地脱氮中的耦合关系分析[J]. 工业水处理,2015(1):5-8. (DING Yi, WANG Wei, WANG Yuhui, et al. Analysis on the coupling relationship between dissolved oxygen and carbon source in the nitrogen removal of constructed wetlands [J]. Industrial Water Treatment,2015(1):5-8. (in Chinese))
- [15] 吴文卫,杨逢乐,李转寿. 利用微生物菌剂净化城市河道水质试验研究[J]. 环境科学导刊,2013(2):63-65. (WU Wenwei, YANG Fengle, LI Zhuanshou. A research on purifying urban river water by microbial agents [J]. Environmental Science Survey, 2013 (2): 63-65. (in Chinese))

(收稿日期:2016-11-28 编辑:彭桃英)

(上接第 160 页)

- [9] 李宗礼,李原园,王中根,等. 河湖水系连通研究:概念框架[J]. 自然资源学报,2011,26(3):513-522. (LI Zongli, LI Yuanyuan, WANG Zhonggen, et al. Research on interconnected river system network: conceptual framework [J]. Journal of Natural Resources,2011,26(3):513-522. (in Chinese))
- [10] 李宗礼,郝秀平,王中根,等. 河湖水系连通分类体系探讨[J]. 自然资源学报,2011,26(11):1975-1982. (LI Zongli, HAO Xiuping, WANG Zhonggen, et al. Exploration on classification of interconnected river system network [J]. Journal of Natural Resources,2011,26(11):1975-1982. (in Chinese))
- [11] 窦明,崔国韬,左其亭,等. 河湖水系连通的特征分析[J]. 中国水利,2011(16):17-19. (DOU Ming, CUI Guotao, ZUO Qiting, et al. Character analysis of river and lake system interconnection [J]. China Water Resources, 2011(16):17-19. (in Chinese))
- [12] 夏军,高扬,左其亭,等. 河湖水系连通特征及其利弊[J]. 地理科学进展,2012,31(1):16-31. (XIA Jun, GAO Yang, ZUO Qiting, et al. Characteristics of interconnected rivers system and its ecological effects on water environment [J]. Progress in Geography,2012,31(1):16-31. (in Chinese))
- [13] 董崇智,姜作发. 黑龙江、绥芬河、兴凯湖渔业资源[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,2004.
- [14] 崔亚锋,陈菁,代小平. 基于灰色关联模型的松花江流域大型灌区现状评价[J]. 水利经济,2013,31(4):54-58. (CUI Yafeng, CHEN Jin, DAI Xiaoping. Evaluation of current situation of large-scale irrigation districts in Songhua River Basin based on grey correlation model [J]. Journal of Economic of Water Resource,2013,31(4):54-58. (in Chinese))

(收稿日期:2017-04-21 编辑:徐娟)