文章编号:1007-2284(2021)07-0072-09

城市河流蜿蜒度变化对河流生态环境影响的量化研究

于子铖[1],赵进勇[1],王　琦[1],张　晶[1],彭文启[1],韩会玲[2]

(1. 中国水利水电科学研究院,北京 100038; 2. 河北农业大学,河北 保定 071001)

摘　要:为进一步明确城市河流蜿蜒度变化对河流生态环境的影响,基于研究区域现状,从生物栖息地与河流水质两个方面入手,选取有效栖息地面积(*WUA*)与深潭浅滩变化、化学需氧量(COD)和总磷(TP)作为特征性指标,选择北京市南沙河老牛湾附近河段作为研究对象,通过梳理相关资料、现场调查等方式获取基本数据,以基础散点数据构建所选河段的不同平面蜿蜒程度,利用MIKE21和RIVER2D分别对其进行水动力水质模拟,根据模拟结果中鱼类有效栖息地面积与所选控制断面的水质变化进行分析,从而将河流平面蜿蜒形态变化对河流生态环境的影响进行量化研究。结果表明,随着河流蜿蜒度的变小,目标鱼类栖息地面积与深潭浅滩个数逐渐减少,*WUA*由占河道总面积的28.9%降至11.2%,深潭浅滩个数由10减少至4;河流水质也逐渐变差,COD与TP浓度都呈整体上升趋势。最终明确了河流生态环境会随着蜿蜒度的变小而发生恶化。

关键词:蜿蜒度;栖息地;水质;量化

中图分类号:TV147　　**文献标识码**:A

于子铖,赵进勇,王　琦,等.城市河流蜿蜒度变化对河流生态环境影响的量化研究[J].中国农村水利水电,2021(7):72-80,86.

YU Z C, ZHAO J Y, WANG Q, et al. Quantitative research on the impact of urban river meandering change on the river ecological environment[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(7):72-80,86.

Quantitative Research on the Impact of Urban River Meandering Change on the River Ecological Environment

YU Zi-cheng[1], ZHAO Jin-yong[1], WANG Qi[1], ZHANG Jing[1], PENG Wen-qi[1], HAN Hui-ling[2]

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
2. Hebei Agricultural University, Baoding 071001, Hebei Province, China)

Abstract: In order to further clarify the impact of changes in the meandering of urban rivers on the ecological environment of the river, this paper, based on the current situation of the study area, starts with two aspects of biological habitat and river water quality, and selects effective habitat area (*WUA*), pool and riffle, chemical demand oxygen content (COD) and total phosphorus (TP) are used as characteristic indicators, and the river section near Laoniu Bay of Nansha River in Beijing is selected as the research object. The basic data is obtained by combining relevant data with field surveys. The different plane meandering degrees of the selected river sections are simulated by using MIKE21 and RIVER2D. According to the simulation results, the effective fish habitat area and the water quality changes of the selected control section are analyzed so as to meander the river plane. The influence of serpentine morphology changes on the river ecological environment is quantitatively studied. The results show that as the meandering of the river becomes smaller, the target fish habitat area and the num-

收稿日期:2020-09-14

基金项目:水体污染控制与治理重大专项(2018ZX07105-002);中国水科院创新领军人才项目(WE0145B532017);水利部公益性行业科研专项(201501030)。

作者简介:于子铖(1993-),男,博士研究生,主要从事于河湖水生态保护与修复。E-mail:761014057@qq.com。

通讯作者:张　晶(1981-),女,正高级工程师,博士,研究方向为生态水工学、水生态修复理论与技术等方面。E-mail:zhangjing@iwhr.com。

ber of deep pools and shoals gradually decrease. *WUA* accounts for 28.9% of the total river area to 11.2%, and the number of deep pools and shoals decreases from 10 to 4. River water quality is gradually getting worse, and both COD and TP show an overall upward trend. Finally, it is clear that the ecological environment of the river will deteriorate as the meandering becomes smaller.

Key words: sinuosity; habitat; water quality; quantification

0 引　言

河流不能只单一的研究,需要结合其存在与演进的大背景[1]。城市河流是自然生态系统和区域经济社会系统相互联系的重要纽带[2]。近些年来,随着城市化的推进与发展,城市河流的整治往往会更加的关注行洪与资源开发利用,常常会忽略河流的生态状况与水质情况[3]。水流与河流的平面形态共同设定河流生态系统的物理基础,影响河流生态系统功能[4]。渠道化、人工化等河流整治方式令河流的平面形态发生改变,从而水流运动状态随之改变,影响污染物在河流中的混合、扩散、稀释与迁移[5]。此整治方式除使河流水质发生恶化之外,还会破坏河流内部的地貌多样性,致使自然河流中的主流、支流、浅滩与急流相间的格局发生变化,这种变化直接造成水中生境的退化,河流生物急剧减少或消失[6]。

近年来,许多专家在河流蜿蜒程度与河流生态环境之间关系进行了研究。2008年张亮[7]等人,构建以河道形态、河岸带状况、河床形态作为一级指标的河流形态学评价方法,得出河流形态的综合形态学指数与河流自净能力呈正相关的关系。2014年,何嘉辉[8]等人选取TP、NH_3-N等特征性指标,对河流线型与河流自净能力的关系进行了量化研究,得出了水质指标沿程消减率与河流线型蜿蜒程度呈现正相关。2018年,孙然好[9]等人以海河流域为例分析了不同河流生境水生生物特征的差异,揭示了鱼类多样性高的局部区域共性是河流比降大、断流风险低的区域,在大尺度角度分析下河流蜿蜒度对于鱼类多样性影响较小。

本文选取北京市南沙河老牛湾附近河段为研究河段,从生物栖息地与河流水质两个方面,利用MIKE21与RIVER2D模型进行河流蜿蜒度变化对河流生态环境影响的量化研究,旨在明确河流蜿蜒程度对河流生态系统的重要性,从而为城市河流整治提供理论依据,同时为南沙河的规划发展提供参考。

1　研究区域概况

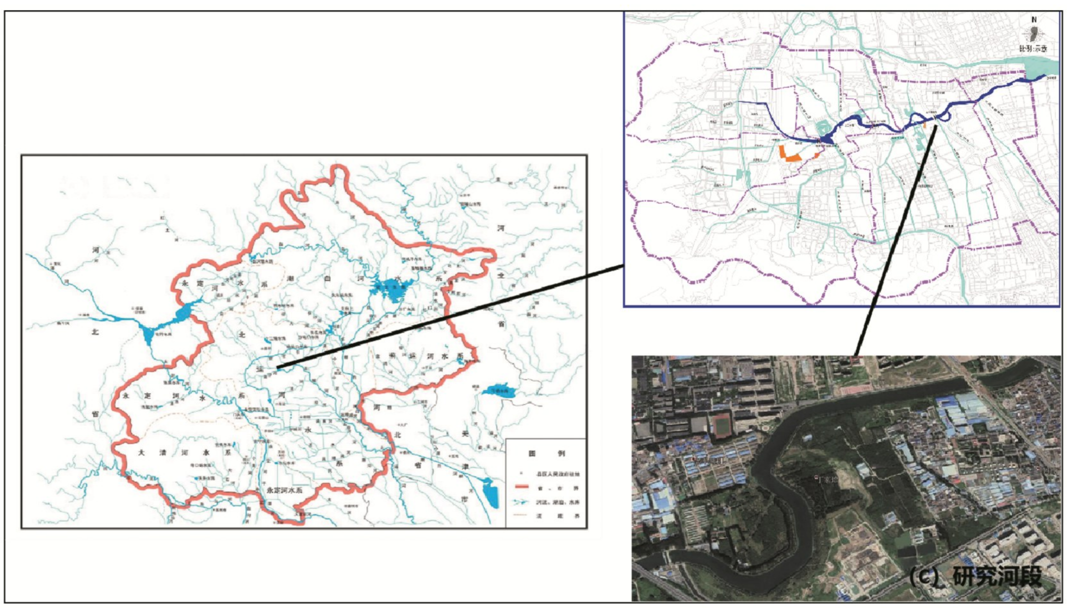
南沙河是海淀地区重要的排洪河道,贯穿海淀新区中部,干流大约长23 km。南沙河在京包快速路西侧、老牛湾附近有一段U型弯道,河道转弯半径非常小。经过现场踏勘与资料收集,老牛湾附近的鱼类主要有鳗鲡、麦穗鱼、大鳞泥鳅、鲤鱼、鲫鱼和草鱼等鱼类。基于研究区域实际状况与代表性和易操作性等选取原则,选择鳗鲡与鲤鱼作为指示鱼类。查阅北京市相关规划与标准,南沙河水质类别定位为Ⅳ类水体。但在2017年的水质监测结果中,老牛湾附近河段的现状水质为劣Ⅴ类,COD、TP严重超标。因此,选取COD、TP作为特征性指标,用于探讨蜿蜒度与河流水质之间的关系。

2　模型建立

2.1　模型介绍

2.1.1　MIKE 21模型

MIKE21是丹麦水力研究所研发,是一款集水动力、水质以及波浪等多方面多功能的大型商业性软件。在目前,其主要用于水体的(包括河流、海湾与海洋临近岸边的区域)水流和水环



(a) 区域图　　(b) 流域图

图1　研究区域

Fig.1 Study area

境的模拟，其中最核心最基础的模块是水动力学模块（HD）[10]，水质模块需在其基础上进行搭建，水质模型可以研究水体污染物的迁移转化。

水质模块的控制方程为对流扩散方程，具体见下式：

$$\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial x}+v\frac{\partial C}{\partial y}=D_x\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}+D_y\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \tag{1}$$

式中：C是污染物浓度；D_x、D_y为x与y方向上的扩散系数。

2.1.2　RIVER2D模型

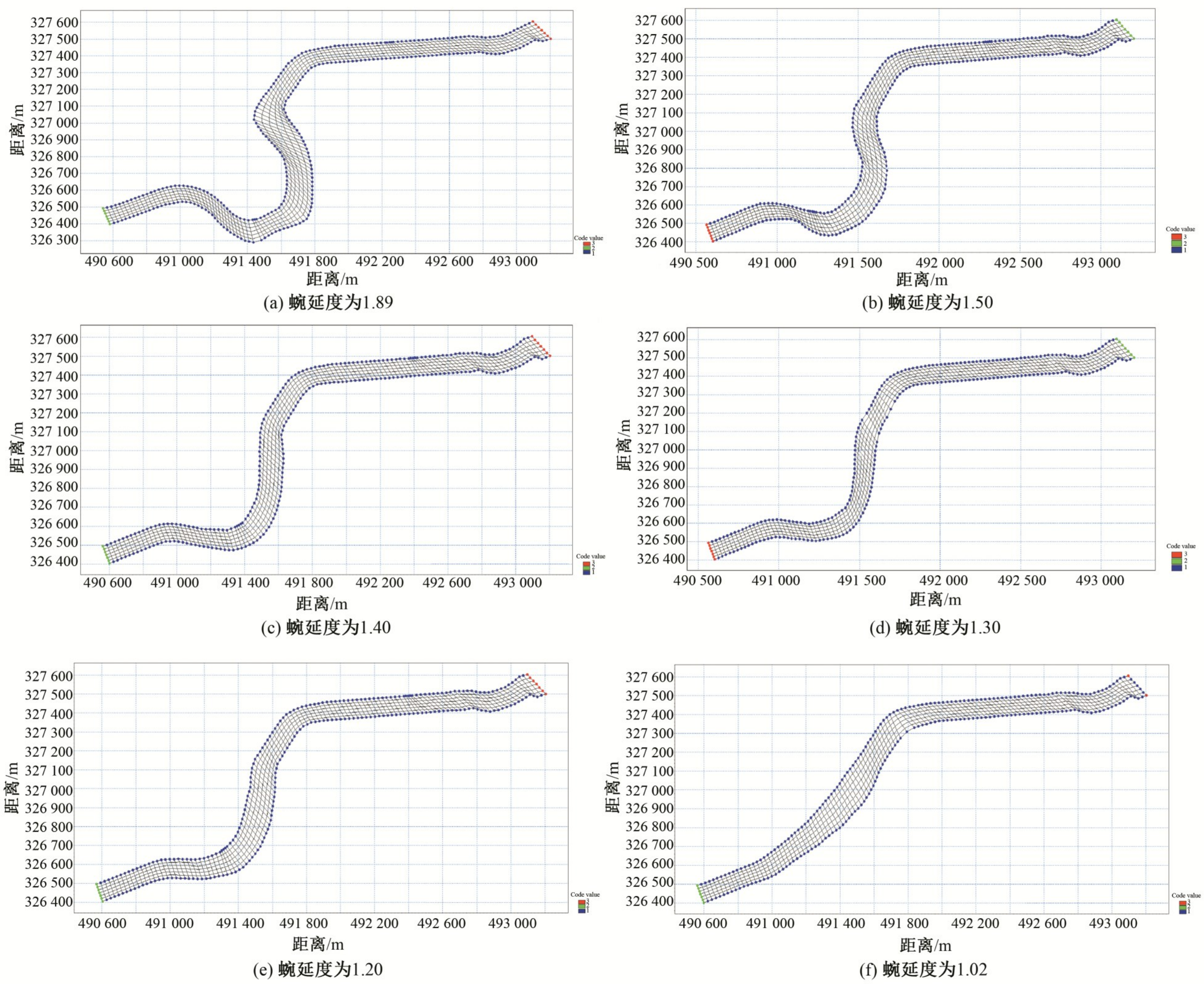
RIVER2D由加拿大Alberta大学研制开发，可被用来进行水动力、鱼类栖息地的模拟。RIVER2D模型进行鱼类栖息地模拟首先需要确定目标鱼类各微生境因子的适宜曲线，其次将各个影响因子适宜值按顺序进行组合分析，从而汇总分析得到目标鱼类的加权可利用的面积Weighted Usable Area，简称WUA[11]。

$$WUA=\sum_{i=1}^{n}CSF(V_i,C_i,D_i)\times A_i \tag{2}$$

式中：n为单元个数；A_i为计算单元的面积；$CSF(V_i,C_i,D_i)$代表的是每一单元综合的适宜性值；i代表的是划分单元的个数；V、C以及D三者分别为流速、河床底质与水深适宜度指数。

2.2　不同蜿蜒度的构建

蜿蜒度为河段两端点之间河流弯曲弧线长度与直线长度的比值[12]。根据蜿蜒度定义以及研究区域实际状况，基于实地勘测数据，利用复制法（复制周边散点高程）、插值法（利用MIKE模型内插高程）构建6种不同的蜿蜒度，依次为1.89（现状）、1.50、1.40、1.30、1.20、1.02（规划）。具体网格图见图2。



(a) 蜿延度为1.89　(b) 蜿延度为1.50　(c) 蜿延度为1.40　(d) 蜿延度为1.30　(e) 蜿延度为1.20　(f) 蜿延度为1.02

图2　不同蜿蜒度

Fig.2　Different sinuosity

2.3　模型的建立

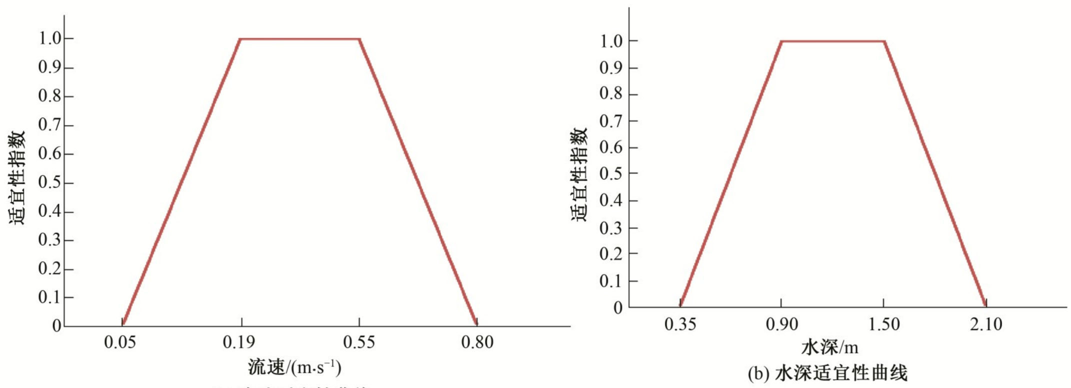
2.3.1　边界条件与参数设定

结合实地调研与相关数据梳理，MIKE21水动力模块上游边界设置为78 m^3/s，下游边界设置为35 m。河床底床摩擦力取34 $m^{1/3}/s$。水质模型在水动力模型的基础上进行搭建，边界初始条件为COD 57、TP 0.63 mg/L。River2d模型设置的上下游边界、底床摩擦力与MIKE水动力模型相同。

结合研究区域实际状况，在本次水质模拟中，河流中污染物COD、TP的降解系数分别取为0.18、0.06（1/d）左右。初始水位取35 m，COD、TP初始浓度为57、0.63 mg/L。

2.3.2　适宜性曲线的确定

适宜性曲线将鱼类生长和环境因子之间关系进行了定量化，本文参考相关专家学者文献[13-19]，经归纳分析，得出指示鱼类的适宜性曲线。



(a) 流速适宜性曲线　(b) 水深适宜性曲线

图3　流速水深适宜性曲线

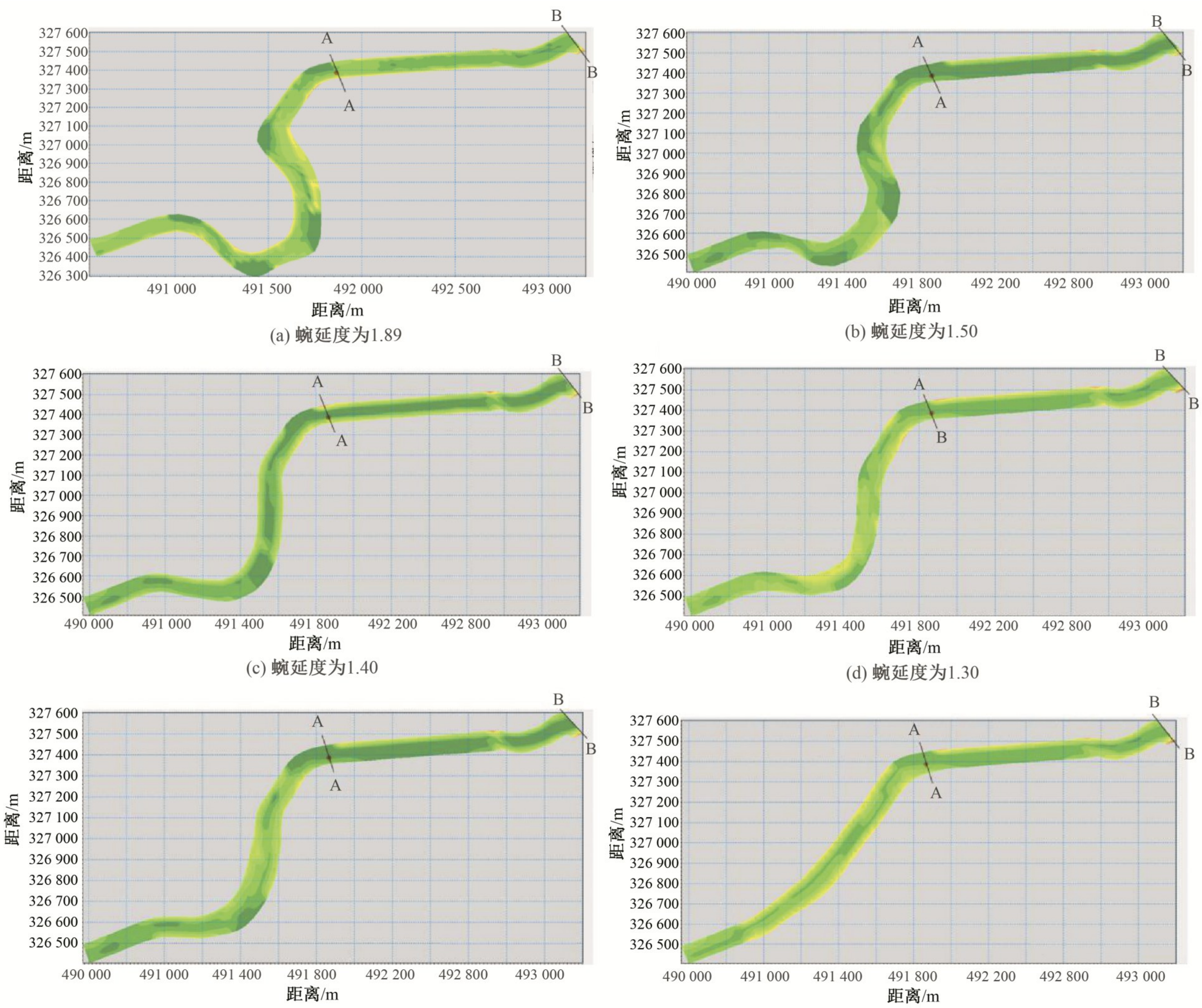
Fig.3 Suitability curve of velocity and depth

2.3.3 控制断面位置

基于实地调研和相关数据，选择弯曲段后A-A(491866，327386)、断面出口B-B(493720，327565)作为控制断面。不同平面形态控制断面图见图4。

2.3.4 模型率定

依据2008年的《南沙河综合整治相关规划》，南沙河治理标



(a) 蜿延度为1.89　(b) 蜿延度为1.50

(c) 蜿延度为1.40　(d) 蜿延度为1.30

(e) 蜿延度为1.20　(f) 蜿延度为1.02

图4　不同平面蜿蜒形态所选控制断面图

Fig.4 Selected control cross-sections of meandering shapes in different planes

准为20年一遇，对应洪峰流量520 m^3/s。将模型模拟水位与2016年《海淀区南沙河(上庄闸～区界)清淤治理工程》(已批复正在实施)设计水位进行对比，发现水位基本吻合，相对误差较小，模型数据可靠。

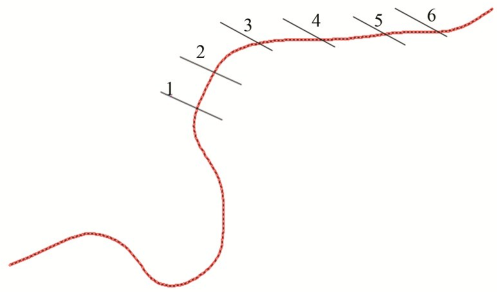


图5 断面示意图

Fig.5 Sectional schematic

表1 断面1~6模拟与设计水位

Tab.1 Section 1~6 simulation and design water level

断面名称	1	2	3	4	5	6
MIKE21模拟水位/m	38.50	38.43	38.28	38.15	38.03	37.96
RIVER2D模拟水位/m	38.55	38.43	38.20	38.08	37.96	37.92
设计水位(已批复清淤工程)/m	38.45	38.40	38.40	38.39	38.36	38.28
MIKE21相对误差/%	0.13	0.08	0.3	0.6	0.8	0.8
RIVER2D相对误差/%	0.26	0.08	0.52	0.80	1.05	0.98

3 结果分析

3.1 模拟结果

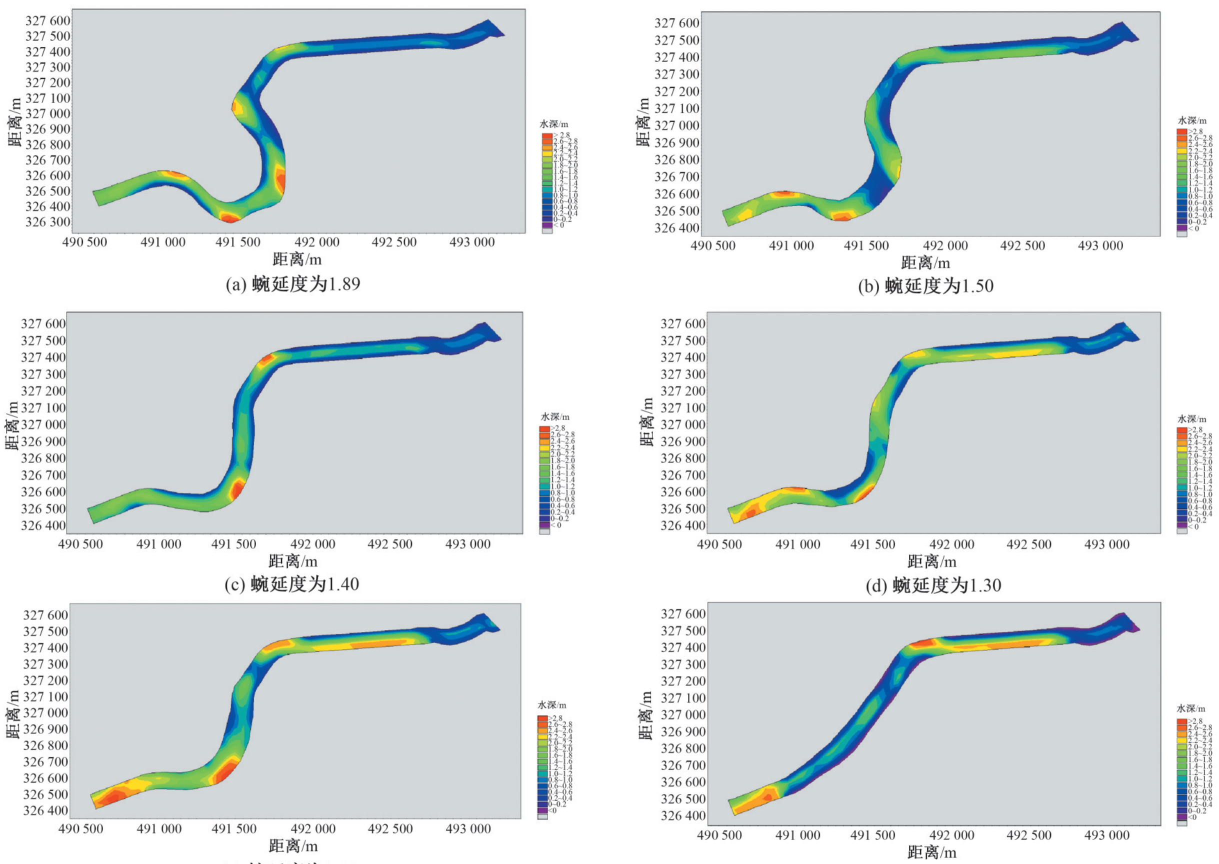
3.1.1 水深分布

不同平面蜿蜒形态水深模拟结果图见图6。

由图6可以看出,随着蜿蜒度的降低,水深区间也逐渐变小,由0~2.8 m降至为0.15~2.25 m,水深多样性呈现递减趋势。河段下游尤其是弯曲部分至出口段,随着蜿蜒度降低,明显可以看出水深逐渐变深,整体河段水深呈现均一性。

3.1.2 水 质

根据对不同平面蜿蜒形态的水质情况对比,量化分析河流的蜿蜒程度对河道水质的影响。不同平面蜿蜒形态水质模拟结果图见图7~10。



(a) 蜿延度为1.89

(b) 蜿延度为1.50

(c) 蜿延度为1.40

(d) 蜿延度为1.30

(e) 蜿延度为1.20

(f) 蜿延度为1.02

图6 水深分布图(1.89~1.02)

Fig.6 Water depth distribution map

由图7~10可知,无论是COD还是TP,两断面浓度都随时间的变化呈下降趋势。针对两指标下降趋势来说,因降解率的不同,COD降解更快一些。除蜿蜒度最小形态,其余蜿蜒度下两个断面的浓度变化图都存在一个拐点,存在一个极大值。根据实际状况推测这种情况的原因,在模型设置中,这两个断面默认开始有水。由于河流的自净,河流水质整体呈现变好的趋势。等上游来水到达此位置,河流污染物浓度会有一个小趋势上升。无论是时间上还是空间上,蜿蜒度为1.89的水质情况都整体好于蜿蜒度为1.02的。

3.1.3 有效栖息地面积

不同蜿蜒度下,目标鱼类有效栖息地面积分布图见图11。

*WUA*数值越大表示越适宜,由图11可知,栖息地的分布存在差异,但大多分布在河段开始部位与拐弯部位,蜿蜒度相邻的形态(如1.89与1.5、1.4与1.3)分布差异不是太为明显,但蜿

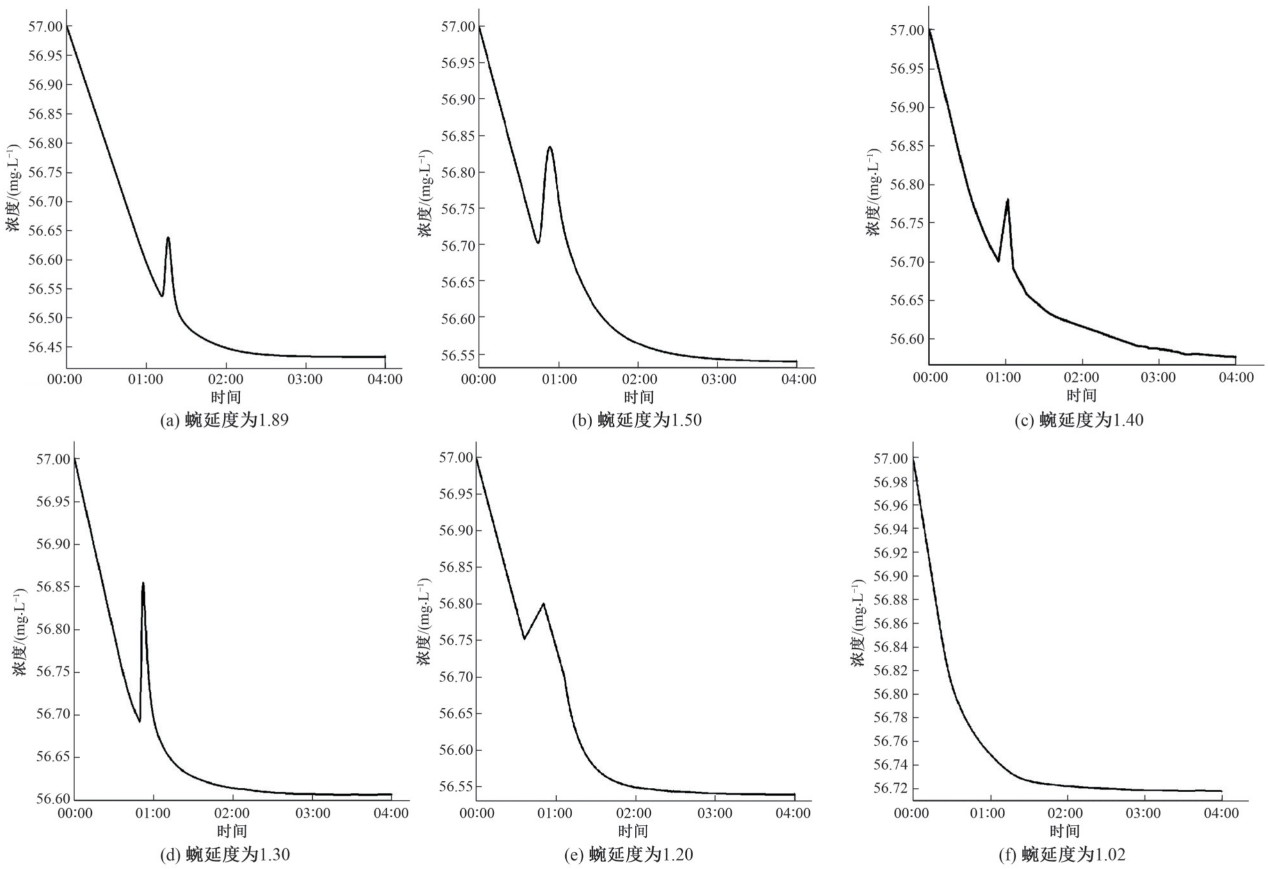


图7　不同蜿蜒度下A-A断面COD浓度变化

Fig.7 Changes of COD concentration in A-A section under different sinuosity

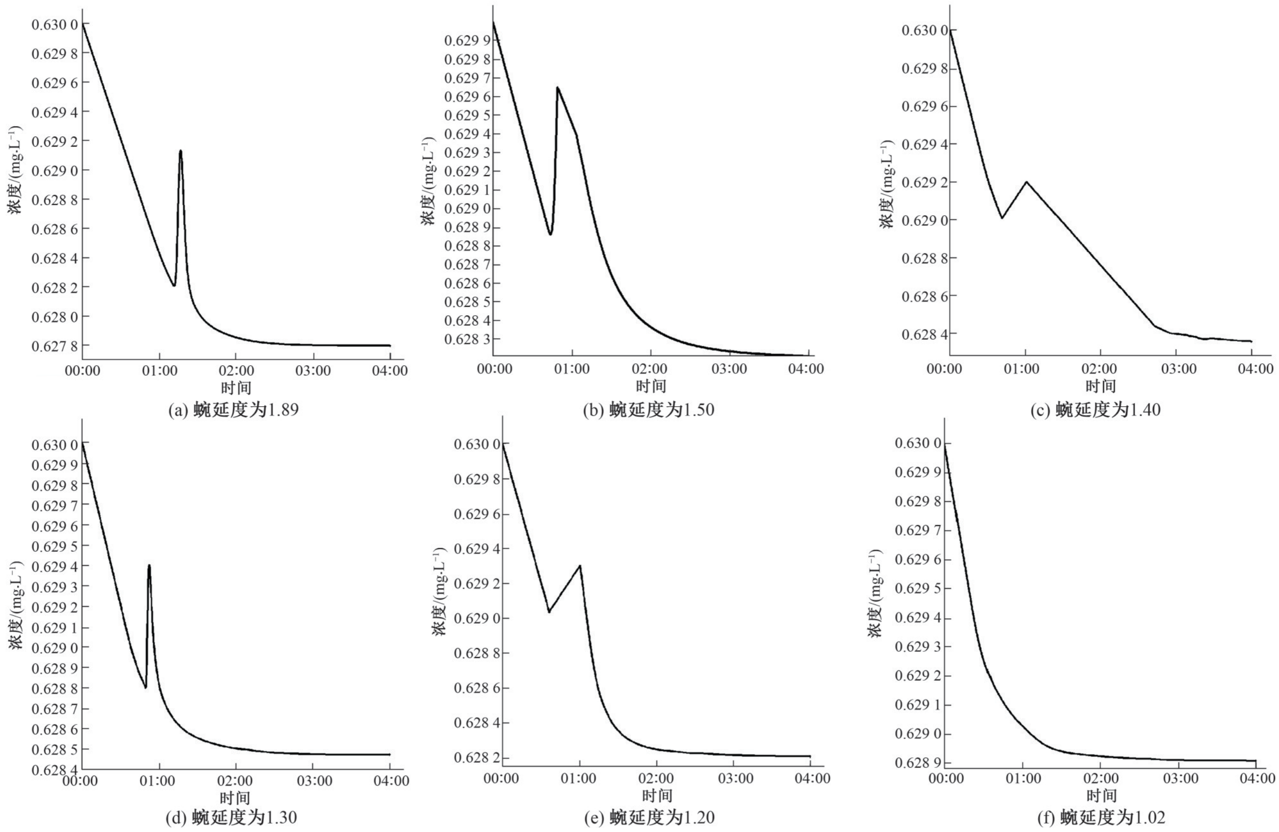


图8　不同蜿蜒度下A-A断面TP浓度变化

Fig.8 Changes of TP concentration in A-A section under different sinuosity

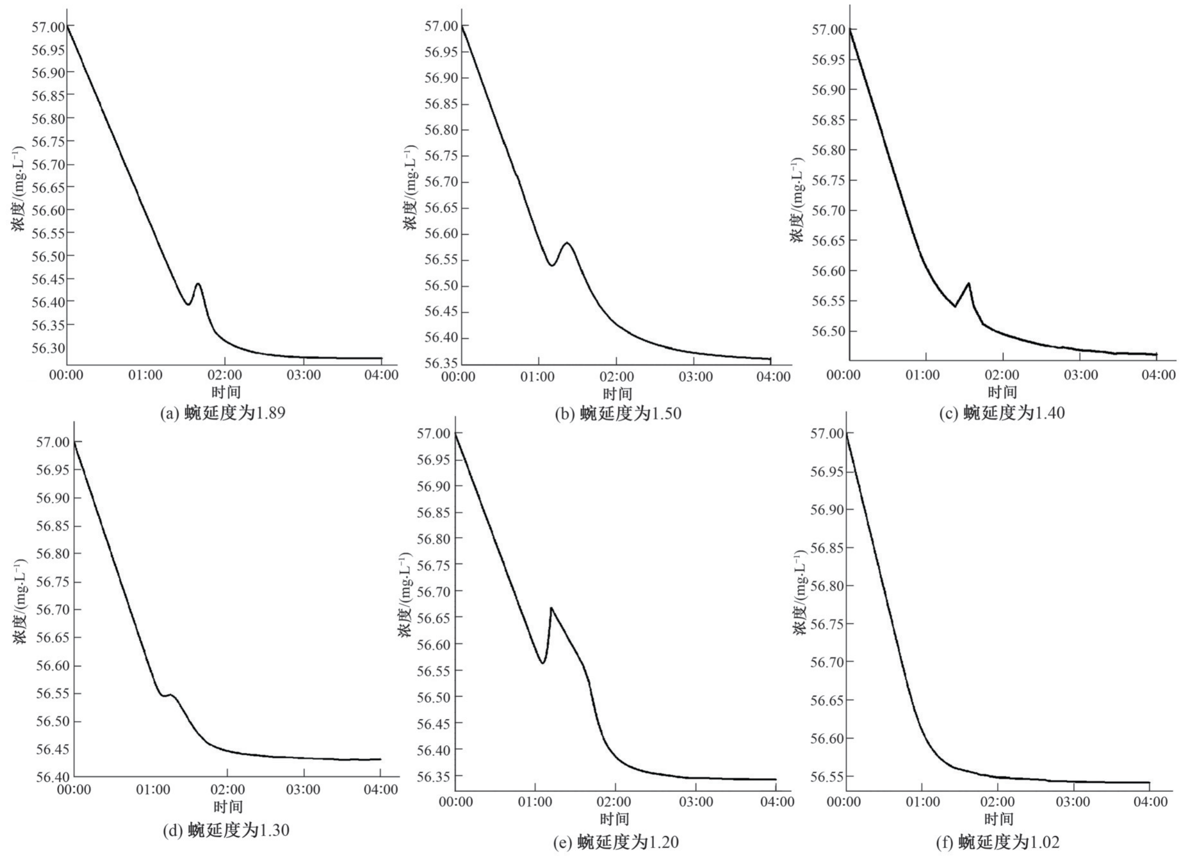


图9　不同蜿蜒度下B-B断面COD浓度变化

Fig.9 Changes of COD concentration in B-B section under different sinuosity

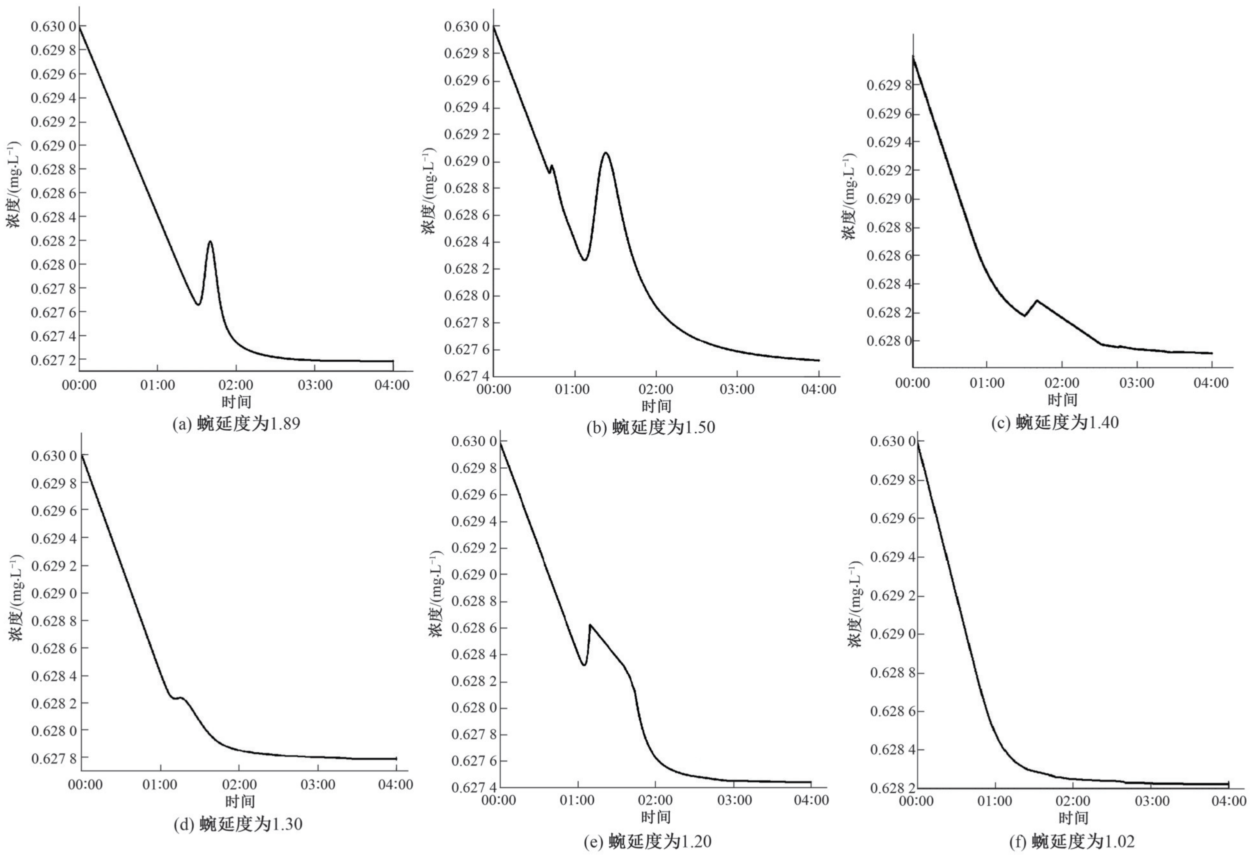


图10　不同蜿蜒度下B-B断面TP浓度变化

Fig.10 Changes of TP concentration in B-B section under different sinuosity

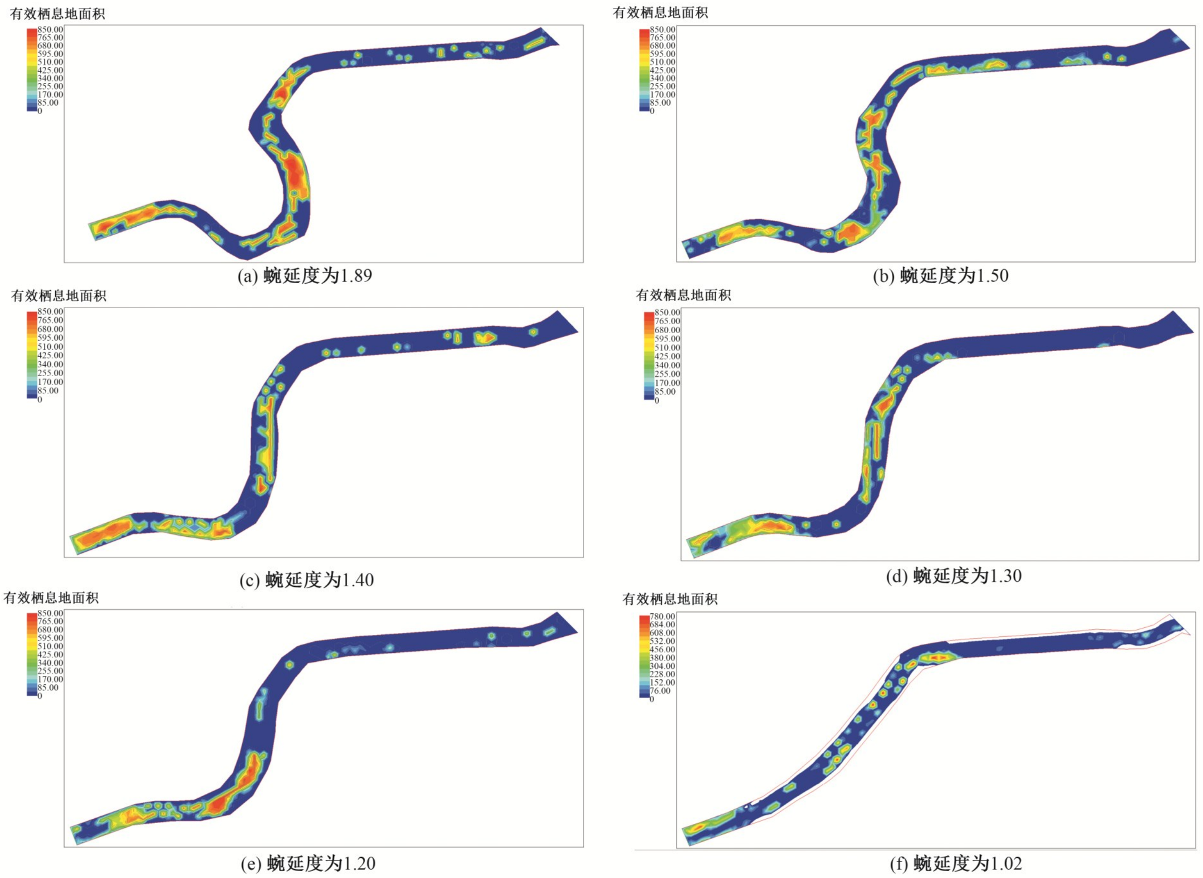


图11　栖息地分布(蜿蜒度1.89~1.02)

Fig.11 Habitat distribution (sinuosity 1.89~1.02)

蜒度持续降低,分布差异会较为明显,蜿蜒度为1.02的形态,有效栖息地面积最小,并且分布不连续。从整体来看,鱼类有效栖息地面积随着蜿蜒度的逐渐减小而减小,当蜿蜒度为1.02时,*WUA*最小。

3.2 结果分析

3.2.1 蜿蜒度变化对河流水质影响分析

对不同蜿蜒度下,两断面稳定后的COD、TP浓度进行归纳梳理。趋势图见图12。

由图12知,随着蜿蜒度的增大,两断面COD、TP的浓度整体都呈一个下降的趋势。针对蜿蜒度1.89的河段,A-A断面最后COD、TP浓度约为56.43、0.627 8 mg/L,B-B断面最后COD、TP浓度约为56.27、0.627 4 mg/L;蜿蜒度为1.02的河段,A-A断面最后COD、TP浓度约为56.72、0.628 9 mg/L,B-B断面最后COD、TP浓度约为56.55、0.628 2 mg/L。明显可以看出,蜿蜒度大的河流,其自身调节能力明显好于蜿蜒度低的河流,河道水质状况较好,蜿蜒程度与水质状况呈现正相关关系。

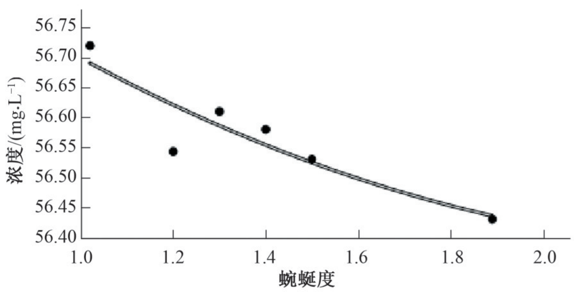
3.2.2 蜿蜒度变化对鱼类栖息地影响分析

将不同蜿蜒度下的有效栖息地面积数据进行统计,统计结果见表2。

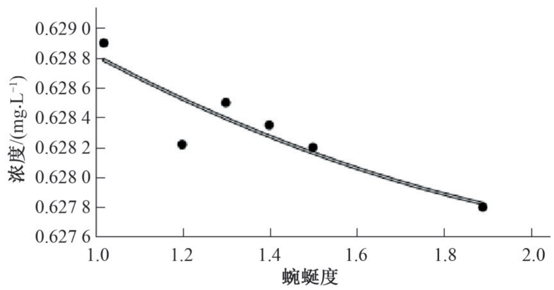
由表2可知,蜿蜒度为1.89的河段有效栖息地面积占比最大,可达28.9%。之后依次减小,蜿蜒度为1.02的*WUA*仅占总河段面积的11.2%,减少了15%。栖息地是鱼类生存、生活的场所,*WUA*急剧减少势必会对河流生态系统造成不可避免的损失。蜿蜒度为1.4与1.3的河段,*WUA*占比相差不大,都可达20%以上。整体上,有效栖息地面积随着蜿蜒度的减小而减小。

3.2.3 蜿蜒度变化对深潭浅滩影响分析

深潭、浅滩作为河流地貌中的常见单元,具有重要生态意



(a) A-A断面COD浓度



(b) A-A断面TP浓度

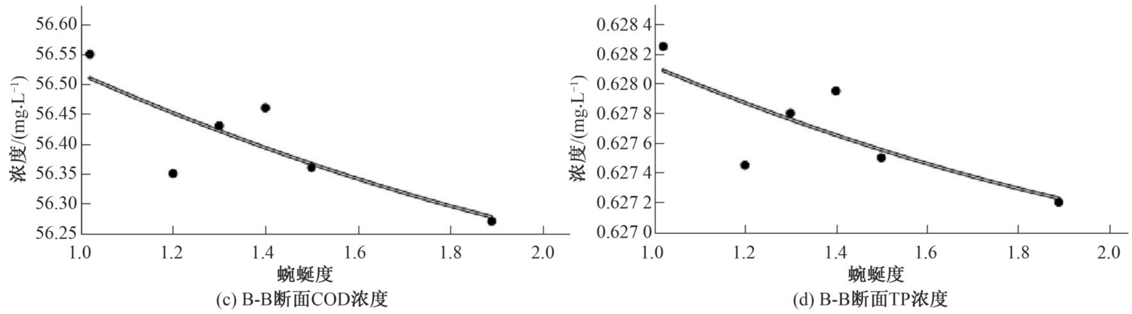


图12 不同蜿蜒度下两断面COD、TP浓度变化趋势图

Fig.12 Trends of COD and TP concentrations in two sections of meandering in different planes

表2 不同蜿蜒度下有效栖息地面积占比结果统计

Tab.2 Statistics on the results of the proportion of effective habitats in different sinuosity

蜿蜒度	*WUA*	*TA*	*WUA* 占比/%
1.89	120 726	418 290	28.9
1.50	97 282	374 540	25.9
1.40	79 515	338 669	22.5
1.30	69 580	324 232	21.5
1.21	57 522	341 921	17.5
1.02	36 663	325 656	11.2
平均值			21.25

义，有助于河流植被的良好发育和构建多样性的生物栖息地。基于实地调研地形数据，通过MIKE模型进行插值处理，利用局部高程差异法，结合模拟的水深分布，统计蜿蜒度1.89和1.02河段的深潭浅滩个数变化，量化蜿蜒度变化对河流地貌单元的影响。每约200 m取一个断面，蜿蜒度1.89的河段有16个断面，1.02的河段有11个断面，具体图见图13。

局部高程差异法步骤[20,21]是：①从河段上游至下游依次计算相邻断面最深位置的高程差B_1−B_2、B_2−B_3、B_3−B_4…，并且计算得出其标准差S_D；②将相邻断面最深位置的高程差符号相同的点汇总为一个序列，计算每一个序列内高程差的总和，记为E_i；对E_i进行逐步累加，求出$\sum E_i$；③依据相关公式定量判断深潭浅滩的高差范围最小值T。$T=k\ S_D$，一般情况下取k=0.5~2.2，本文旨在研究蜿蜒度变化对地貌单元的影响，结合前人的研究，取k =1。④比较T和$\sum E_i$的大小关系，确定深潭浅滩的个数。基于上述步骤，得到研究河段两种形态下的相关结果，具体结果如表所示。随着蜿蜒度的变化，深潭浅滩个数明显变少，由10降至4，严重影响河流地貌的多样性，破坏河流生态环境。

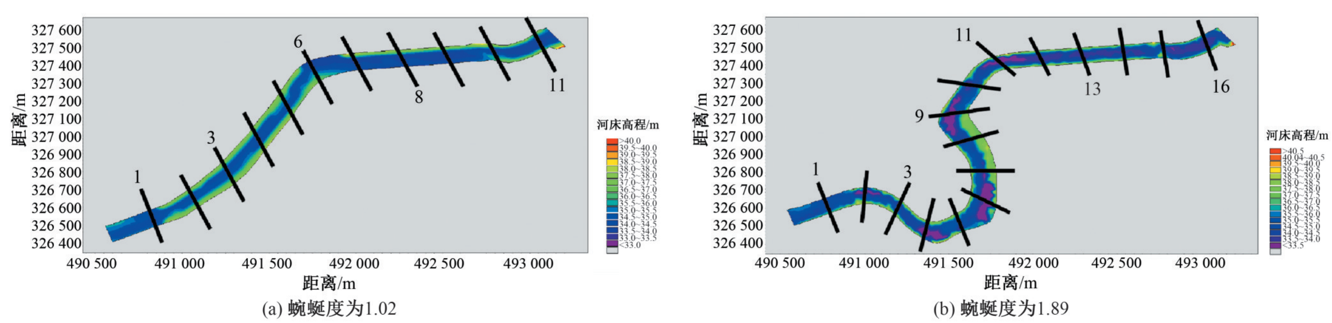


图13 河段地形及断面选取

Fig.13 Topography and cross-section selection of the river section

表3 深潭浅滩统计

Tab.3 Statistics of pool and riffle

蜿蜒度	标准差 *SD*	深潭个数	浅滩个数	深潭所在断面	浅滩所在断面
1.89	1.154	5	5	2、4、6、9、11	1、3、5、7、10
1.02	0.310	2	2	2、6	1、5

4 结 论

城市河流兼顾行洪排涝、生态安全、景观格局功能加强等需求。在城市化的进程中，河流尤其是城市河流的发展，不能单纯地从某个方面进行考虑。随着生态理念的逐步深入，城水融合、人水和谐逐步得到落实，以水融城、以水塑城，综合考虑城市河流平面布局。本文量化分析了城市河流蜿蜒程度的变化与河流生态环境的关系，为城市河流的综合治理提供理论依据。统筹治理水安全、水环境、水生态、水资源、水文化，保障城市河流具备一定的蜿蜒性，从而提升河流水质，保障生物多样性，改善河流生态环境。 □

参考文献：

[1] 董哲仁.河流生态系统研究的理论框架[J].水利学报，2009，40(2)：129-137.

[2] 许凤冉，刘德杰，白音包力皋.山区城市河流综合治理模式及案例探讨[J].中国水利水电科学研究院学报，2016，14(4)：274-279.

[3] 庄需印，刘冬杰，宋 斌.城市河流现行治理存在的问题及生态修复技术初探[J].亚热带水土保持，2013，25(2)：67-70.

（下转第86页）

[3] DEPOUNTIS N, KOUKIS G, SABATAKAKIS N. Environmental problems associated with the development and operation of a lined and unlined landfill site: a case study demonstrating two landfill sites in Patra, Greece [J]. Environmental Geology, 2009, 56 (7): 1 251-1 258.

[4] YANG N, DAMGAARD A, LU F, et al. Environmental impact assessment on the construction and operation of municipal solid waste sanitary landfills in developing countries: China case study [J]. Waste Management, 2014, 34(5): 929-937.

[5] 王力功,王 健. 垃圾渗滤液处理技术发展现状及应用[J]. 煤炭科学技术,2017,45(增刊2):55-58.

[6] 穷达卓玛,汪 晶,周文武,等. 拉萨垃圾填埋场渗滤液处理站周边土壤重金属含量分析及评价[J]. 环境化学,2020,39(5):1 404-1 409.

[7] 姜凤成,李义连,杨国栋,等. 某化工场地地下水中污染物运移模拟研究[J]. 安全与环境工程,2017,24(2):8-15.

[8] 李阳坤,于福荣,孙 剑,等. 灰渣填埋场地下水中典型污染物迁移数值模拟[J]. 人民长江,2020,51(11):46-52,166.

[9] 薛 丹,唐晓声,李海建. 地下水的污染与修复[J]. 环境与发展,2017,29(10):71-72.

[10] 彭盼盼,黄 凯,伍靖伟. 地下水重金属铬污染试验观测与预测分析[J]. 中国农村水利水电,2018(5):95-102.

[11] 王 喆,卢 丽,夏日元. 基于GMS的北京西郊垃圾场地下水溶质运移模拟[J]. 人民黄河,2012,34(11):85-87.

[12] QIAN H, CHEN J, HOWARD K W F. Assessing groundwater pollution and potential remediation processes in a multi-layer aquifer system[J]. Environmental Pollution, 2020, 263: 114 669.

[13] 李 巍,卢玉东,卢阳春,等. 基于Visual Modflow的山区某再生铜地下水污染模拟[J]. 中国农村水利水电,2019(3):28-31.

[14] 孙从军,韩振波,赵 振,等. 地下水数值模拟的研究与应用进展[J]. 环境工程,2013,31(5):9-13.

[15] 赵 贝,刘建军. 基于Visual Modflow地下水污染物溶质运移的模拟[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2015,33(6):787-792.

[16] 赵春兰,凌成鹏,吴 勇,等. 垃圾渗滤液对地下水水质影响的数值模拟预测:以冕宁县漫水湾生活垃圾填埋场为例[J]. 环境工程,2017,35(2):163-167.

[17] 马建花,曾润强,边世强,等. 基于Visual Modflow的河流阶地灌溉区地下水模拟分析:以黑台为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2020,56(5):580-586.

[18] RADMANESH F, GOLABI M R, KHODABAKHSHI F, et al. Modeling aquifer hydrograph: performance review of conceptual MODFLOW and simulator models[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(5).

[19] 廖 镭,张 涵,郭珊珊. 简易垃圾填埋场渗滤液地下水溶质运移数值模拟[J]. 安全与环境工程,2019,26(2):76-83.

[20] 郑 佳. 北京西郊垃圾填埋场对地下水污染的预测与控制研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2009.

[21] KAMARUDDIN M A, YUSOFF M S, RUI L M, et al. An overview of municipal solid waste management and landfill leachate treatment: Malaysia and Asian perspectives [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(35): 26 988-27 020.

[22] CAROLINE BAETTKER E, KOZAK C, KNAPIK H G, et al. Applicability of conventional and non-conventional parameters for municipal landfill leachate characterization[J]. Chemosphere, 2020, 251: 126 414.

[23] 赵群英,赵 炎. 垃圾填埋场渗滤液水质演变特性分析[J]. 西安工业大学学报,2013(10):809-813.

(上接第80页)

[4] 赵进勇,孙东亚,董哲仁,等.浙江孝顺溪河流地貌多样性修复设计探讨[C]//中国水利学会青年科技工作委员会.中国水利学会第四届青年科技论坛论文集.中国水利学会青年科技工作委员会:中国水利学会,2008:8.

[5] 王随继,任明达.根据河道形态和沉积物特征的河流新分类[J].沉积学报,1999(2):75-81.

[6] 董哲仁,孙东亚,赵进勇,等.河流生态修复[M].北京:中国水利水电出版社,2013.

[7] 张 亮.城市河流形态与河流自净能力的关系[C]//中国生态学会青年工作委员会.第五届中国青年生态学工作者学术研讨会论文集.中国生态学会青年工作委员会:广东省科学技术协会科技交流部,2008:87-92.

[8] 何嘉辉,潘伟斌,刘方照.河流线型对河流自净能力的影响[J].环境保护科学,2015,41(2):43-47,113.

[9] 孙然好,程 先,陈利顶.海河流域河流生境功能识别及区域差异[J].生态学报,2018,38(12):4 473-4 481.

[10] 许 婷.MIKE21 HD计算原理及应用实例[J].港工技术,2010,47(5):1-5.

[11] 闫文龙.汉江汉中平川段鱼类生境特征及模拟研究[D].西安:西安理工大学,2017.

[12] 王宏涛.蜿蜒型河流空间异质性和物种多样性相关关系研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2017.

[13] 蒋天宝,刘利平,高晓阳,等.日本鳗鲡人工繁育研究的进展[J].水产科技情报,2011,38(3):121-127.

[14] 王 武.特种水产品养殖新技术[M].北京:中国农业出版社,1996.

[15] 刘 静.盐度对鲤鱼繁殖及相关指标的影响[D].大连海洋大学,2015.

[16] 朱元宗,孙婷亭,刘红凡,等.节约型园林在城市人工湖管理中的应用:以洛阳市开元湖音乐喷泉水质改善为例[J].中国园艺文摘,2013,29(4):87-88.

[17] 毛建春.鲤鱼的繁育技术[J].黑龙江水产,2009(6):6-9.

[18] 刘海晶,王彬彬.鲤鱼人工繁殖技术[J].吉林农业,2011(6):269.

[19] 郝生凡.鲤鱼的人工繁殖[J].养殖技术顾问,2012(7):259.

[20] 李 倩,吕平毓,彭期冬,等.基于深潭浅滩分布的长江上游保护区铜鱼产卵场地形分析[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(增刊2):273-278.

[21] 张 辉,危起伟,杜 浩,等.长江上游干流基于河床地形的深潭浅滩识别方法比较研究[J].淡水渔业,2011,41(1):3-9.