

1980—2015年清水河流域水系连通变化研究

王坤^{1,2} 许超³ 王文杰³ 吴秀芹^{1,2,†}

1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012; † 通信作者, E-mail: wuxq@bjfu.edu.cn

摘要 为揭示城市化发展情景下区域水系连通的变化规律, 以永定河支流清水河流域为对象, 集成遥感影像、统计资料及土地利用等数据, 运用河流连通性综合评价体系, 将基于障碍物累积影响的河流纵向连通性及基于土地破碎度的河流横向连通性相结合, 系统性地研究1980—2015年清水河流域的水系连通性变化。根据专家知识并结合清水河实际情况, 可将清水河河道障碍物分为水库、水闸、漫水桥和河道堆积物4种类型。1980—2015年障碍物的数量持续增长, 2000年比1980年增加10.4%, 2015年增加23.9%。1980—2015年, 清水河流域纵向连通性整体上呈升高趋势, 纵向连通性差的汇水区比例由1980年的40%逐渐降低至2015年的14%。纵向连通性升高的区域集中在流域东部及中部, 西南部部分汇水区连通性加剧恶化。河流横向连通性整体上变化不明显, 其中流域西部有所下降, 东部有所好转。1980—2015年清水河流域综合连通性整体上呈升高趋势, 综合连通性差的汇水区占比在1980, 2000和2015年分别为26%, 17%和11%。综合连通性升高的区域集中在流域东部, 而流域西南部部分区域连通性始终较差。研究结果揭示了京津冀城市化进程中流域连通性的变化规律, 可为区域防洪减灾和河流生态修复提供参考。

关键词 障碍物; 连通性; 土地破碎度; 汇水区; 清水河

Study on the Change of River Connectivity in Qingshui River Basin from 1980 to 2015

WANG Kun^{1,2}, XU Chao³, WANG Wenjie³, WU Xiuqin^{1,2,†}

1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation of State Forestry Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012; † Corresponding author, E-mail: wuxq@bjfu.edu.cn

Abstract In order to reveal the changing rules of regional water system connectivity under the development of urbanization, this paper takes Qingshui River, a tributary of the Yongding River, as an object, integrates remote sensing imagery, statistical data, and land use data, uses the comprehensive evaluation system for river connectivity, combining the longitudinal connectivity of rivers based on the cumulative effects of barriers and the lateral connectivity of rivers based on the effects of catchment fragmentation, and systematically studies the connectivity changes of water systems in the Qingshui River Basin from 1980 to 2015. The results of the study indicate that based on expert knowledge and combined with the actual situation of the Qingshui River, the barriers of the Qingshui River can be divided into four types: reservoirs, sluice gates, diffuse bridges, and river accumulations. During the study period, the number of barriers continues to increase. In 2000, the number of barriers increases by 10.4% in comparison with 1980 and increases by 23.9% in 2015. From 1980 to 2015, the longitudinal connectivity of the Qingshui River Basin as a whole shows an upward trend. The proportion of the watershed with poor vertical connectivity gradually decreases from 40% in 1980 to 14% in 2015. The areas with increased vertical connectivity are mainly concentrated in the eastern and central parts of the basin, and the connectivity in the southwestern part of the catchment area deteriorates. The overall change in river lateral connectivity is not significant, with the western part of the basin decreasing and the eastern part having improved.

From 1980 to 2015, the comprehensive connectivity of the Qingshui River Basin shows an overall upward trend. The proportion of catchments with poor comprehensive connectivity is from 26% in 1980, 17% in 2000 and 17% in 2015, respectively. The areas with increased connectivity are mainly concentrated in the east of the basin, while the connectivity in some areas in the southwest of the basin is always poor. The study reveals the law of connectivity changes in the basin during the urbanization process in Beijing, Tianjin and Hebei, and can provide a scientific reference for regional flood prevention and disaster reduction and river ecological rehabilitation.

Key words barrier; integrated connectivity; land-use fragmentation; catchment; Qingshui River

河流水系是陆地水系统的重要构成元素,其分布和连通对水循环和水资源状况都有重要影响。水系连通是景观生态完整性的重要组成部分^[1],连通性越高,河流生态系统的整体性越强,生态系统的自我修复能力越强。影响水系连通的因素很多,其中影响最显著的是人为干扰^[2]。随着城市化等人类活动的加剧,流域下垫面发生较大的变化,大量末端河流被城市用地侵占,河道堵塞,河网水系结构发生不同程度的改变^[3]。尤其是都市城郊河流,与自然河流相比,有更多的水利设施和便民景观设施,这些设施对河流连通性造成更加严重的影响,直接后果是淡水环境呈破碎化趋势,河流连通状况变化剧烈,水动力条件减弱,洪涝灾害加剧,河流生态系统及生物群受到干扰^[4]。因此,全面量化地评价水系连通性,分析河流连通变化规律,更加准确地识别流域连通受损区域,可为区域防洪减灾和河道生态修复提供科学参考。

目前,关于河流水系连通的定义尚无定论,国内外学者从不同角度赋予定义^[5-9]。Hooke^[10]从河流地貌学的角度,将连通性定义为河流系统中流水和沉积物的物理连接。夏军等^[11]定义水系连通性为在自然和人工形成的江河湖库水系基础上,维系、重塑或新建满足一定功能目标的水流连接通道,以便维持相对稳定的流动水体及其相互联系的物质循环状况。一般认为,河网水系的连通机制主要包括4个方面:纵向连通,指河流源头到河口的连通;横向连通,指主河槽与河岸带之间的相互连通;垂直连通,指河流地表水与地下水的连通;时间连通,指短期与长期的连通^[12-14]。河流连通性评价研究是近20年来发展起来的^[15]。有学者将河网定义为树枝状的生态网络,并根据图论的思想,将水系用图加以简明的描述,计算河流的纵向连通性^[16-18]。Cote等^[16]根据障碍物(如闸坝等)对水中生物(如鱼类等)的阻碍作用,进行河流纵向连通性的估算。还有部分学者从河流植物演替、生物迁移、泥沙运移、地形地貌变化以及溶质养分运移等多个

方面进行河流横向连通性的研究^[19-21],其中赵进勇等^[19]基于图论连通度理论,将河道-滩区系统中的地貌单元概化为图模型,建立图的邻接矩阵,进行连通性分析和水流通道连通度计算,实现河道-滩区系统连通程度分析的量化。

尽管国内外学者从多个领域研究了河流的纵向和横向连通性,但在评价水系连通性时,很少将两者放在一起考虑。将两者相结合,对整个河流的连通性进行全面量化的评估,能够更准确地识别流域连通受损区域^[22]。京津冀地区城市化进程迅速,流域水环境十分脆弱。在此背景下,本研究以永定河支流清水河水系为例,依据河流连通性综合评价体系,用多种度量标准来量化河流连通性,综合反映1980—2015年清水河的水系连通性变化。

1 研究区概况

北京市清水河是永定河官厅山峡段右岸支流,位于北京市门头沟区境内(图1)。清水河流向为自西向东,流经上清水、下清水、西斋堂、东斋堂、西胡林、东胡林和军响,至青白口处注入永定河。清水河全长51.4 km,流域面积为556.5 km²,海拔273~2303 m^[23]。流域内地貌类型以山区为主,气候类型属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均降水量为450~550 mm,全年降水量60%集中于6—9月,年均气温为6~8℃。土地利用以林地、草甸、灌木林地和农耕地为主。清水河流域内水文地质情况复杂,历史上多次出现强降雨引发山洪和泥石流等灾害。部分地区为矿山型小流域,长期以矿石开采经济为主,生态环境脆弱,水土流失问题突出,且部分沟道被堵塞,严重影响沟道行洪安全。

2 数据来源

清水河水系数据以北京市第一次水务普查河湖成果《门头沟水系图》经过数字化提取。土地利用数据(1980, 2000和2015年)来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>); 1980—2015

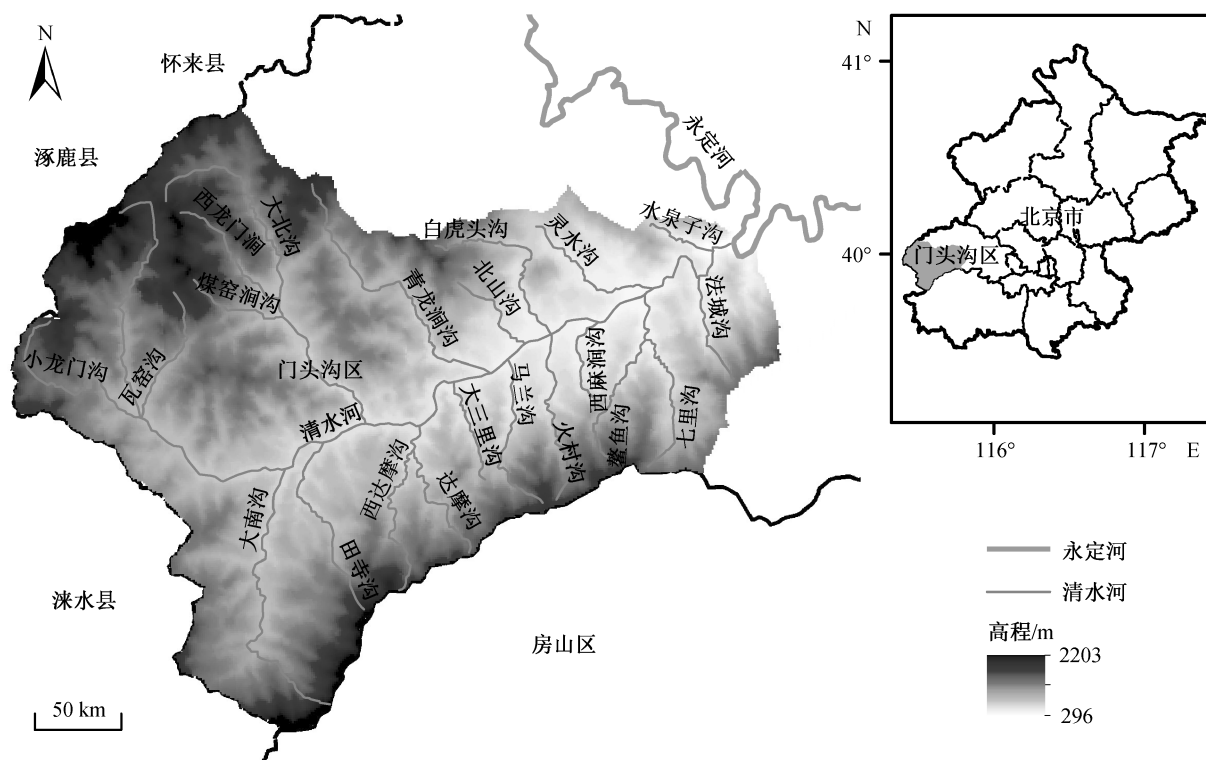


图1 研究区概况

Fig. 1 General situation of study area

年多期 Google Earth 影像及 2015 年门头沟清水河流域高分一号卫星 2 m 分辨率遥感影像来自中国资源卫星应用中心。京津冀数字高程模型 (DEM) 30 m 分辨率数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 提供的 ASTER_GDEM30m 数字高程产品。

统计资料包括《北京市第一次水务普查成果丛书 河湖普查成果》、《北京市第一次水务普查成果丛书 水利工程普查成果》、《门头沟区水利志》^[24-26] 以及《门头沟水务成果》(来自门头沟区水务局网站 (<http://swj.bjmtg.gov.cn/>)) 等, 主要用于验证所提取的障碍物信息以及对河道障碍物进行分类, 是权重赋值的重要依据。

3 河流连通性综合评价体系

3.1 纵向连通性

3.1.1 河道障碍物分类及权重

水坝、堰以及其他流动结构性障碍(河道堆积物)打破了河流的自然连通, 使其成为一系列孤立的流段^[27]。由于过度建设水闸、堰和坝等人为设施, 使得基流量显著减小, 打破水沙、水热平衡, 阻隔生物上下游迁徙路径, 严重影响河流生态完整性。水流流速减小, 也降低了污染物扩散的

能力和水体的自净能力。并且, 由于部分河道中存在自然或人为堆积物, 使得汛期河道泄洪能力明显降低。

根据专家知识和相关资料, 并结合清水河实际情况, 可将影响清水河河道连通的障碍物分为水库、水闸、漫水桥和河道堆积物。蓄水能力不同, 不同类型的障碍物阻碍水流和水生生物的程度不同。本文根据 Stein 等^[28] 确定的影响分数标准(主要结构权值为 1.0, 堰和水闸权值为 0.3, 小型结构权值为 0.1), 对清水河的河道障碍物赋权(表 1)。在各类河道障碍物中, 水库的蓄水量最大, 通过率最小, 其权重值最大; 与水库相比, 水闸和漫水桥对水流的影响更局限, 因此权重值比水库小一个等级; 河道堆积物多为小型结构, 权重值最小。

首先, 对遥感数据源进行预处理, 准备清水河水系数据, 结合多源遥感影像(Google Earth 多期影像、高分一号卫星遥感影像)与相关资料, 对障碍物构建解译标志。然后, 沿着河流干流和支流, 依据 Google Earth 影像, 全面查找障碍物, 通过目视解译提取各类河道障碍物, 对于影像不清晰, 找到区域对应或者临近时期的高清影像作为辅助, 2015 年以高分一号卫星影像作为辅助, 其他两个时

表 1 河道障碍物分类及赋权
Table 1 Classification and weights for river barriers

类型	特征描述	权重
水库	是用于径流调节以改变自然资源分配过程的主要措施	1.0
水闸	修建在河道和渠道上利用闸门控制流量和调节水位的低水头水工建筑物	0.3
漫水桥	建在河流上面简易的普通桥, 水位稍稍上涨, 就能从桥面上漫过	0.3
河道堆积物	泥浆淤积和违章建筑物	0.1

期分别为临近多期 Google Earth 影像作为辅助, 以此提高障碍物提取精度。最后, 依据统计资料, 对提取结果进行验证。

3.1.2 纵向连通性计算方法

河流纵向连通性指生物、物质和能量在河流纵向上运移的通畅程度^[20]。河流水系纵向连通性主要取决于河道中存在的障碍物的类别、数量及分布。本研究基于上述水系障碍物分类和提取结果, 侧重于河道内障碍物的累积影响, 依据 Rivers-Moore 等^[22]确立的纵向连通性指数(longitudinal index, LGI), 定量地计算水系纵向连通性值, 具体表现为河道障碍物累积评分, 即将障碍物从独立干扰表征为局部累积的过程。计算公式^[22]如下:

$$LGI = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Barrier weights}}{\text{Max.score}}, \quad (1)$$

其中, Barrier weights 为障碍物的权重, Max.score 为流域内汇水区障碍物权重的累积(和)的最大值。

3.2 横向连通性

河流横向连通性指主河槽与河岸带之间的互相连通^[19,29]。近年来, 随着北京郊区迅速发展, 河流生态环境急剧恶化, 河道及河漫滩出现大量的硬质护岸工程、横向拦挡工程和不合理的土地规划等, 严重地损害了河流的横向连续性, 减小了滩地淹没频率, 减弱了水动力条件及调洪能力。河流横向连通性主要取决于汇水区破碎程度(C)和小水坝密度分数(SDD), 其中汇水区破碎程度基于每个汇水区的面积及其斑块数量来确定。门头沟区小水坝多为用来灌溉和蓄水的塘池和塘坝, 小水坝密度分数由每个汇水区水坝的累计数量确定, 并以该汇水区面积的平方根加以标准化。横向连通性指数(lateral connectivity index, LCI)的计算公式^[22]如下:

$$LCI = \frac{\sum_{i=1}^n (C + SDD)}{\text{Max.score}}, \quad (2)$$

$$C = N/A, \quad (3)$$

其中, N 为汇水区的土地利用斑块数量, A 为汇水区总面积, SDD 为障碍物密度分数, Max.score 为流域内汇水区的 C 与 SDD 累积(和)的最大值。

3.3 综合连通性

河流连通性综合评价体系是将河流纵向与横向连通相结合, 以汇水区为单位, 定量地评价河流水系的连通性。每个汇水区的横向和纵向连通性值经过标准化, 其值域为[0, 1](0 代表连通度最高, 1 代表连通度最低)。将二者相结合, 得到河流综合连通性指数 CI (值域为[0, 2])^[22]:

$$CI = \sum (LGI + LCI), \quad (4)$$

4 结果分析

4.1 清水河纵向连通性

4.1.1 障碍物统计分析

依据前面所述的河道障碍物提取方法, 得到 3 期河道障碍物专题图(图 2), 经《门头沟水利志》、《门头沟水务成果》及《北京市水利工程普查成果》验证, 精度大于 75%。

自 20 世纪 80 年代至今, 清水河流域障碍物总数呈增加趋势, 与 1980 年相比, 2000 年清水河河道障碍物数量增加 10.4%, 2015 年增加 23.9%。其中, 水库和漫水桥数量变化幅度较小, 水闸和河道堆积物数量明显增加, 近 15 年来, 水闸数量增加 75.0%, 河道堆积物增加 41.1% (图 3)。阻碍程度较大的水闸和漫水桥集中分布在清水河的大南沟、田寺沟及西达摩沟等西南部的支流。

4.1.2 清水河河流纵向连通性

由式(1)计算清水河流域各汇水区的 LGI 值。根据 ArcGIS 中自然间断点分级法(基于数据中固有的自然分组, 对分类间隔加以识别, 对相似值进行最恰当的分组, 并使各等级之间的差异最大化), 将 LGI 分为优(0~0.23)、良(0.23~0.53)和差(0.53~1) 3 个等级。纵向连通性等级分布如图 4 所示。

从时间上看, 1980 以来, 清水河流域纵向连通性在整体上呈升高趋势, 纵向连通性差的汇水区占比持续减少, 1980, 2000 和 2015 年分别为 40%, 26% 和 14%。

从空间上看, 清水河流域东部及中部汇水区纵向连通性呈变好趋势, 而西南部部分汇水区连通性退化程度加剧。整体上, 清水河纵向连通性的障碍物数量虽然有所增加, 但集中分布在流域西南部分



图2 清水河流域障碍物分布
Fig. 2 Barriers distribution in the Qingshui River Basin

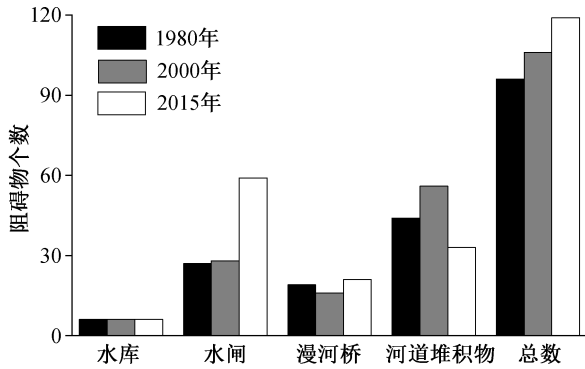


图3 清水河流域障碍物统计
Fig. 3 Statistics of barriers

汇水区,是西南区部分支流纵向连通性变差、整个流域纵向连通性为差的区域减少的主要原因。

4.2 横向连通性

由式(2)计算清水河流域各汇水区的LCI值,依据ArcGIS中自然间断点分级法,将LCI分为优(0.05~0.24)、良(0.24~0.52)和差(0.52~1)3个等级,横向连通性等级分布如图5所示。

从时间上看,清水河流域横向连通性整体上变化不大。在1980,2000和2015年,连通为优的汇水区占比分别为66%,58%和63%,连通为良的汇水区

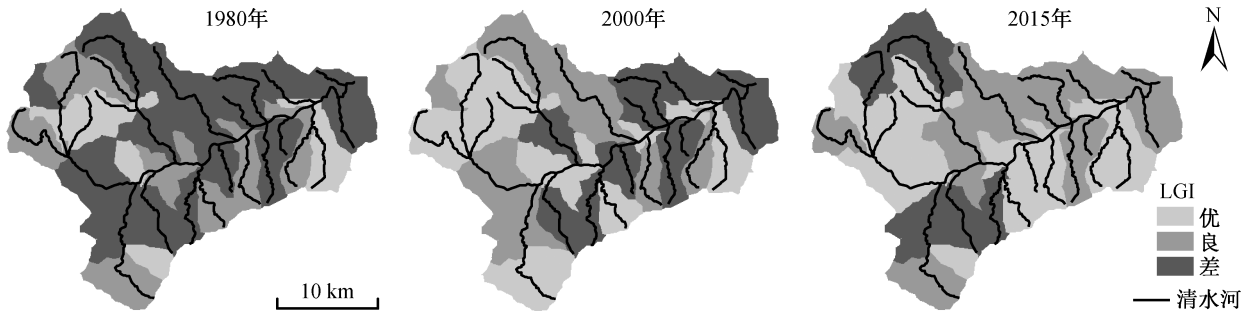


图4 纵向连通性专题图
Fig. 4 Thematic map of longitudinal connectivity

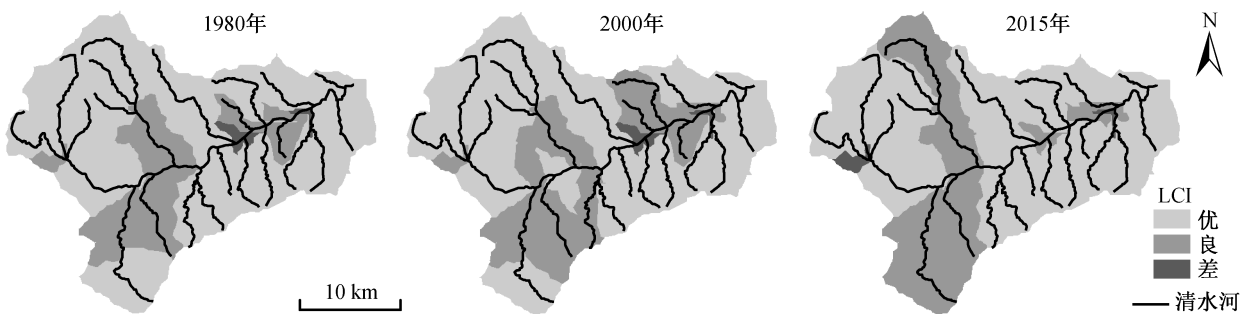


图5 横向连通性专题图
Fig. 5 Thematic map of lateral connectivity

分别占28%, 36%和31%, 连通为差的汇水区占比均为6%。连通为差的汇水区占比无变化, 连通为优的汇水区比重先减12%后增9%, 整体变化量不大。

清水河流域横向连通性变化多体现在空间分布上。2015年, 清水河流域东部横向连通性有所好转, 流域西部横向连通性有所下降(图5)。横向连通性较差的区域多为河流交汇地带, 如灵水沟、七里沟与清水河交汇点, 马兰沟、青龙涧沟与清水河交汇点等, 这些区域多是村镇集中区域, 土地利用类型较多, 斑块破碎程度(C)较大, 同时塘坝型水库分布较多, 小水坝密度分数(SDD)较高, 减弱了水动力条件和调洪能力, 并在一定程度上对生物的扩散造成阻隔。

4.3 综合连通性

根据式(4)计算CI。采用相同分级方法, 将CI值分为优(0~0.45)、良(0.45~0.85)和差(0.85~2.0)3个等级, 清水河流域综合连通性分布情况见图6。

从时间上看, 清水河流域综合连通性呈升高趋势。综合连通性差的汇水区在1980, 2000及2015年分别占26%, 17%和11%, 所占比例在1980—2000年减少34.6%, 2000—2015年减少35.2%。

清水河流域综合连通性的好转主要受纵向连通

性影响(图6)。整个流域有部分区域的综合连通性自1980年到2015年始终为差, 如大南沟、田寺沟、西达摩沟及鳌鱼沟等部分支流。在这些地区, 水利设施较多, 土地利用破碎度程度高, 如2010年开展的永定河流域山区河道生态修复工程, 在大南沟、田寺沟建设塘坝型水库, 同时整修梯田种植水土保持林与苗圃、林地封禁和修建污水处理设施^[23]。

5 结论与讨论

本文以永定河支流清水河流域作为研究区, 采用河流综合连通评价体系, 分析1980年以来清水河连通性变化, 得到以下主要结论。

1) 35年来, 清水河流域河道障碍物总数量呈增加趋势, 其中水库和漫水桥的数量变化幅度较小, 而水闸和河道堆积物的数量变化明显(水闸数量不断增多, 河道堆积物先增加后减少)。

2) 清水河流域纵向连通性差的区域所占比例逐渐减少, 河流横向连通性整体上变化不大, 河流综合连通性为差的区域所占比例逐渐减少, 在1980—2000年期间减少34.6%, 而后在2000—2015年间减少35.2%。35年来, 清水河流域综合连通性呈变好趋势, 但是大南沟、田寺沟、西达摩沟

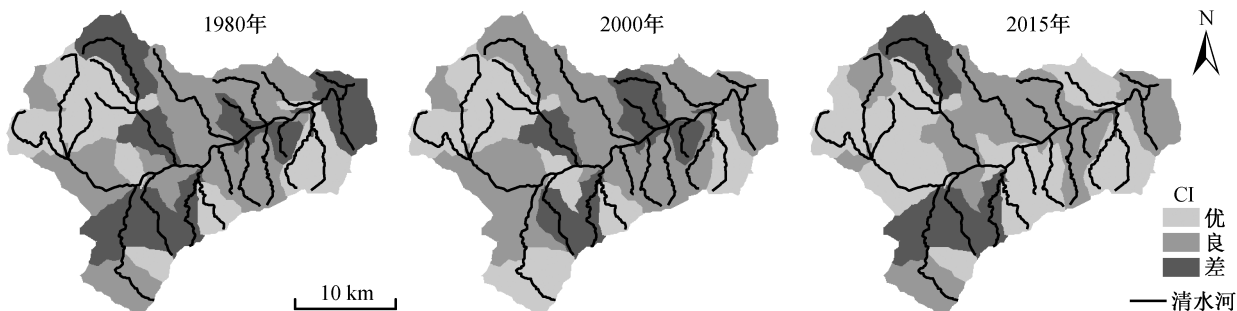


图6 综合连通性专题图
Fig. 6 Thematic map of integrated connectivity

和鳌鱼沟等支流的连通性始终为差。

北京市门头沟区生态修复工作已开展多年,特别是近年来建成包括青龙涧、北沟和鳌鱼沟在内的多条生态清洁小流域^[29],对流域内的沟道和河道采取了诸多生态修复工程,主要包括:对上下游河道进行垃圾清理和清淤疏浚,提高水系纵向连通性;左右岸实施生态护岸、景观塘坝和河(沟)道周边科学土地规划,河(沟)道治理时多采用生态护坡,保证河岸与河流水体之间的水分交换,提高水系的横向连通性。这些小流域的连通性都有较大的提升,且都达到促进河(沟)道水生物体系的良性循环、提升河(沟)道生态功能的目的^[29]。从本文得出的上述支流连通性变化规律来看,青龙涧、法成沟及鳌鱼沟等地区的综合连通性自1980年到2015年逐渐好转,在一定程度上符合现实情况。闸坝等工程的建设 and 河道周围不科学的土地规划影响河流自然连接状态,降低河湖物质能量传递功能,因此未来在清水河流域乃至京津冀地区河流生态治理过程中,应在保证洪涝灾害的抗御性及水资源调控能力的前提下,注重河湖自然连通的保护与修复,依据多指标评估体系,全面地评估区域水系连通性,精确地识别流域连通受损区域,总结连通变化规律,对受损区域进行有针对性的生态修复。

本文在河流综合连通性评价基础上,将河流纵向与横向连通性相结合,以汇水区为单位,量化不同时期的清水河流域横向、纵向及综合连通性,可为定量分析城市化进程中河网水系的连通性变化提供新方法。

确定河流纵向连通性指数的关键在于河道阻碍物及其属性的提取。在现实生活中,河道阻碍物不局限于本文所列的4类,应根据实际情况筛选最适用的阻碍物类型。另外,河道阻碍物及其属性提取具有一定的不确定性,主要是由于历史影像数据分辨率较低对,对一些小型结构(河道堆积物)无法精确地提取,只能结合多期历史影像数据大致加以确定。

连通性指标并非只涵盖河流纵向和横向连通两个层面,还包括时间维度上的连通。但是,目前时间维度连通性的评价方法比较缺乏,加之数据可得性的限制,本文未予考虑。随着相关资料的不断丰富和研究手段的提高,未来可将时间维度纳入区域河流综合连通性评价,为区域防洪减灾和河道生态修复提供更具科学价值的参考。

致谢 北京师范大学蒋卫国教授和中国科学院沈阳应用生态研究所布仁仓研究员对论文撰写给予指导,提出宝贵意见,在此谨致谢忱。

参考文献

- [1] Nadeau T L, Rains C M. Hydrological connectivity between headwater streams and downstream waters: how science can inform policy. *Journal of the American Water Resources Association*, 2007, 43(1): 118–133
- [2] Pringle C M. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important?. *Hydrological Processes*, 2003, 17(13): 2685–2689
- [3] 徐光来, 许有鹏, 王柳艳. 基于水流阻力与图论的河网连通性评价. *水科学进展*, 2012, 23(6): 776–781
- [4] Chessman B C. Biological traits predict shifts in geographical ranges of freshwater invertebrates during climatic warming and drying. *Journal of Biogeography*, 2012, 39(5): 957–969
- [5] Herron N, Wilson C. A water balance approach to assessing the hydrologic buffering potential of an alluvial fan. *Water Resources Research*, 2001, 37(2): 341–352
- [6] Freeman M C, Pringle C M, Jackson C R. Hydrologic Connectivity and the Contribution of Stream Headwaters to Ecological Integrity at Regional Scales. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2007, 43(1): 5–14
- [7] 张欣, 王红旗, 李华. 公路建设对生态环境水系连通性的影响. *环境科学与技术*, 2013, 36(12): 406–411
- [8] 王中根, 李宗礼, 刘昌明, 等. 河湖水系连通的理论探讨. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 523–529
- [9] 张欧阳, 熊文, 丁洪亮. 长江流域水系连通特征及其影响因素分析. *人民长江*, 2010, 41(1): 1–5
- [10] Hooke J M. Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region. *Geomorphology*, 2006, 79(3): 311–335
- [11] 夏军, 高扬, 左其亭, 等. 河湖水系连通特征及其利弊. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 26–31
- [12] Ward J V, Stanford J A. The four-dimensional nature of lotic ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 1989, 8(1): 2–8
- [13] 丰华丽, 王超, 李剑超. 河流生态与环境用水研究进展. *河海大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(3): 19–

23

- [14] Thompson C J, Fryirs K, Croke J. The disconnected sediment conveyor belt: patterns of longitudinal and lateral erosion and deposition during a catastrophic flood in the lockyer valley, south east queensland, Australia. *River Research and Application*, 2016, 32(4): 540–551
- [15] 夏继红, 林俊强, 姚莉, 等. 河岸带的边缘结构特征与边缘效应. *河海大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(2): 215–229
- [16] Cote D, Kehler D G, Bourne C, et al. A new measure of longitudinal connectivity for stream networks. *Landscape Ecology*, 2009, 24(1): 101–113
- [17] Favaro C, Moore J W. Fish assemblages and barriers in an urban stream network. *Freshwater Science*, 2015, 34(3): 991–1005
- [18] 孙鹏, 王琳, 王晋, 等. 闸坝对河流栖息地连通性的影响研究. *中国农村水利水电*, 2016(2): 53–56
- [19] 赵进勇, 董哲仁, 孙东亚, 等. 基于图论的河道-滩区系统连通性评价方法. *水利学报*, 2011, 42(5): 537–543
- [20] Stevaux J C, Corradini F A, Aquino S. Connectivity processes and riparian vegetation of the upper Paraná River, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 2013, 46: 113–121
- [21] 李原园, 郦建强, 李宗礼, 等. 河湖水系连通研究的若干问题与挑战. *资源科学*, 2011, 33(3): 386–391
- [22] Rivers-Moore N, Mantel S, Ramulifo P, et al. A disconnectivity index for improving choices in managing protected areas for rivers. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2016, 26: 29–38
- [23] 吕红霞, 顾斌杰, 张雅利, 等. 永定河支流清水河水资源利用存在问题及对策. *北京水务*, 2015(1): 17–20
- [24] 北京市第一次水务普查工作领导小组办公室. *水利工程普查成果*. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 31–36
- [25] 北京市第一次水务普查工作领导小组办公室. *河湖普查成果*. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 31–36
- [26] 北京市门头沟区水利志编辑委员会. *门头沟区水利志*. 北京: 北京市门头沟区水利志编辑委员会, 1994
- [27] Young W J, Hillman T J. *The Murray River — to the Darling River junction // Young W J. Rivers as Ecological Systems: The Murray-Darling Basin*. Canberra: Murray-Darling Basin Commission, 2001: 101–118
- [28] Stein J L, Stein J A, Nix H A. Spatial analysis of anthropogenic river disturbance at regional and continental scales: identifying the wild rivers of Australia. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 60: 1–25
- [29] 宋瑞莲. 门头沟区清洁小流域建设与山区河道的水环境保护. *北京水务*, 2009(1): 54–55