

黑河流域水生生态系统异质性与环境因子关系研究

王世岩, 毛战坡, 王亮, 杜彦良, 杨素珍
(中国水利水电科学研究院 水环境研究所, 北京 100038)

摘要: 以我国西北干旱区域典型河流——黑河为例, 通过水生生态系统野外调查、水生生物鉴定与数据整理, 对黑河流域水生生态系统空间异质性特征进行了分析; 利用空间相关分析和主成分分析等技术方法, 对流域水生生态系统空间异质性特征的主要环境影响要素进行了筛选和识别分析。分析表明: 在影响黑河流域水生生态系统的各环境因子之间, 具有一定的信息冗余和相互作用关系。绝对高度与相对高度、径流深、降水、净初级生产力等因子之间具有较好的正相关关系; 而绝对高度与蒸发量、平均气温及干旱指数之间具有较为明显的负向相关关系。地形因子中海拔高度以及气候因子中降水量与干旱指数这3个环境因子指标与流域的水生生态系统异质性空间分布特征关系较大, 是干旱区黑河流域水生生态系统空间格局宏观分异的主要环境影响因子。

关键词: 水生生态系统; 空间异质性; 环境因子; 黑河流域

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)06-0007-06

Study on relationship between heterogeneity of aquatic ecosystem and environment factors in Heihe river basin

WANG Shiyan, MAO Zhanpo, WANG Liang, DU Yanliang, YANG Suzhen

(Institute of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Taking a typical river of northwest arid region such as Heihe river for example, through field surveys of aquatic ecosystems, aquatic organisms identification and data processing, the paper analyzed the feature of aquatic ecosystems spatial heterogeneity in Heihe river basin. Meanwhile, it identified and analyzed the major environmental factors of aquatic ecosystems spatial heterogeneity in the basin by use of the methods of correlation analysis and principal component analysis. The analysis showed that among every environment factor which impacts the aquatic ecosystems in Heihe river basin, there are some information redundant and interaction relationship. The absolute elevation has a good positive correlation relationship with the factors such as relative elevation, runoff depth, precipitation and net primary productivity (NPP), and has more obvious negative correlation relationship with evaporation, average temperature and drought index. The three indicators such as altitude elevation in terrain factor (DEM), rainfall and drought index in climatic factors have greater relationship with the feature of spatial distribution of aquatic ecosystem heterogeneity in Heihe river basin, which are the main factors of environmental effect to spatial heterogeneity of aquatic ecosystems in arid area of Heihe river basin.

Key words: aquatic ecosystem; spatial heterogeneity; environment factor; Heihe river basin

1 研究背景

生物和非生物因子的相互作用和相互制约形成水生生态系统变化的动力, 而非生物环境是河流生态系统演替的驱动力, 但是具有明显的空间连续性^[1]。在非生物环境的作用下, 水生生态系统针对变化影响程度, 表现出多种不同特征的变化, 如量变、

质变、渐变、突变等变化^[2]。不同的流域气候、地质与地形等条件, 使得水生生态系统的物种种类组成、优势种及健康标准等出现不同的响应, 使之呈现不同的空间异质性特征^[3]。随着人类社会的不断发展, 通过流域水资源开发、水利工程、水电开发等改变河流的水文情势、水质以及水生生物栖息地环境等, 带来河流断流、湖泊萎缩、水体富营养化、鱼类等水生

收稿日期: 2014-05-28; 修回日期: 2014-08-02

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-002-05); 国家自然科学基金项目(51179207)

作者简介: 王世岩(1974-), 男, 山东济南人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事流域水生生态功能分区、湿地生态、环境评价等研究。

物数量骤减等严重的水生态环境问题,引起世界各国的高度重视,日益关注河流水生态系统变化的环境因子和驱动机制研究^[4]。我国近年来主要侧重河流水生态物种保护,对于流域水生态系统空间异质性特征及其影响因子方面考虑相对较少,难以为河流水生态提供针对性的保护目标,而且现有研究较少考虑西北干旱区内陆河流域水资源和水质变化,较少考虑水生态系统变化的特征^[5]。本文选取了我国西北干旱区内陆河流域——黑河流域,通过野外水生生物样品采集与鉴定分析,开展流域水生态系统空间异质性分布特征与环境因子关系研究,辨析流域水生态系统空间格局分异变化的主要环境影响要素,为流域水生态系统保护、受损河流恢复和干旱区水生态文明建设等方面提供相关研究基础。

受人类大规模的农业垦荒和水资源开发影响,黑河流域生态环境问题日趋突出。自20世纪80年代以来,上中游水资源土地资源过度开发严重,造成下游河流严重断流及内陆湖泊干涸等生态问题,流域生态环境严重退化和恶化现象日益明显。国内外诸多学者对于干旱区流域生态退化的水资源、生态特征以及地下水变化等方面开展了较多研究^[6],而对于流域水环境及水生系统方面关注相对较少,尤其在影响该流域水生态系统空间异质性特征的环境因子关系方面的研究更是鲜有报道。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

黑河流域是我国西北干旱地第二大内陆河流域,地跨青海、甘肃和内蒙古3个省区,流域面积14.2万km²,干流全长821km^[3-4]。黑河流域地势上呈现南高北低的特点,流域平均海拔高度为3600m,相对高差3000m左右,较大的海拔高差使得流域生态格局、气候状况具有明显的垂直地带性,整个黑河流域自南向北依次可划分为:上游祁连山山区水源涵养区、中游张掖人工农业绿洲区和下游额济纳旗沙漠绿洲区三个典型区域^[7]。上游祁连山区年降水量相对较高,处于300~500mm之间,中游河西走廊地区年降水量100~250mm,而下游额尔济纳旗绿洲区域降水量不足45mm,属于极端干旱荒漠区域。黑河流域发源于上游祁连山山区约有35条主要河流,流域多年平均水资源总量41.73亿m³,其中出山径流量占88.26%。

2.2 数据来源

本文水生态系统及河流水环境等数据主要来源

于野外实地调查和采样分析。按照典型性、代表性和可操作性的原则,根据流域水生态系统不同类型设置了采样断面,共设置了94个水生态系统采样点(图1)。样品采集与分析方法主要依据水生生物调查有关技术规范^[8]。在野外水生态调查过程中,对河流底质、流速、水深进行了同步测定,并采集了河流水质、底质样品。按照有关测试分析标准,在实验室内完成N、P等生源要素的测试分析。

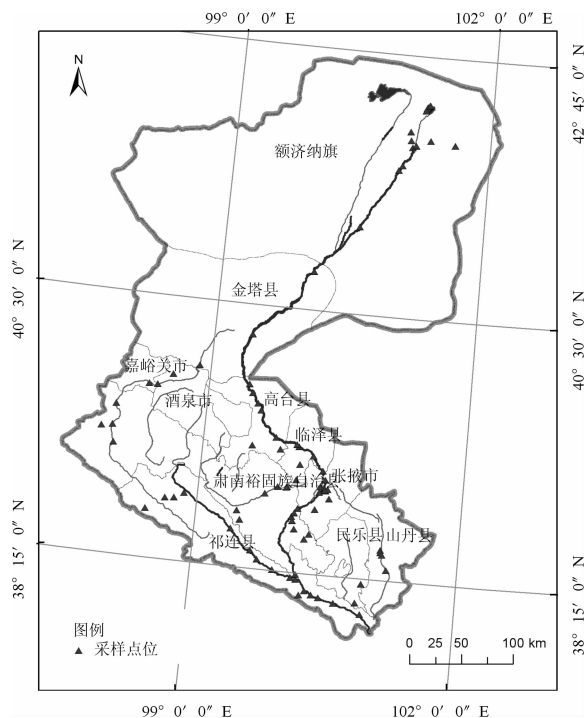


图1 黑河流域野外布设的水生态调查样点

2.3 研究方法

2.3.1 指标因子归一化 为消除环境因子指标量纲差异的影响,客观分析指标空间上影响特征,需进行指标归一化和标准化处理。在指标归一化处理中,考虑各个指标对于水生态系统作用特征,对于流域水生态系统生长发育具有正相关的指标采用公式(1),呈负相关的指标则采用公式(2),从而使得转换后的环境指标数据 X' 越大时,该指标对水生态系统的生长发育等作用就越有利。

$$X'_i = (X_i - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min}) \quad (1)$$

$$X'_i = 1 - (X_i - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min}) \quad (2)$$

式中: X'_i 为第*i*个指标的归一化值; X_i 为第*i*个指标的初始值; $X_{i\max}$ 、 $X_{i\min}$ 分别为第*i*个指标的最大值、最小值。

利用上述归一化公式,对环境因子的指标数据进行归一化处理。在完成指标标准化后,采用ArcGIS样条空间插值法进行栅格化处理,为环境因子

与水生态系统异质性特征分析提供分析数据。

2.3.2 空间主成分分析 考虑到部分环境因子之间存在一定的相关性,为消除信息冗余,突出关键环境因子信息,通过对环境因子主成分分析(PCA)指标降维,可获得相对彼此独立的因子。本文利用 ArcGIS 地理信息系统软件中 Principal Components 工具,对各个指标进行了空间主成分因子转换。主要原理为:利用公式 $\alpha = \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i$,对转换的主因子特征向量进行计算,得到各主因子的贡献率,之后根据主因子累计贡献率的大小,来确定主因子数。通常情况下,取累计贡献率 85% ~ 95% 的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ 对应的第一、第二、……、第 $m (m \leq p)$ 个主成分。

2.3.3 典范对应分析 典范对应分析(CCA)是一种数量排序分析方法,是从对应分析发展而来的。在该排序方法中,通过实现对应分析与多元回归的结合,从而详细地研究生物群落与环境因子之间的相互作用关系。由于典范对应分析可以将多个环境因子结合在一起进行分析,这与直接梯度分析不同,CCA 分析结果直观明显,可以更好地反映生物群落与环境的作用关系^[9],为研究水生态系统和环境因子间的复杂关系提供了有利工具^[10-11]。

本文采用 Cannoca 典范对应分析软件(Cannoca for windows 4.5),对流域水生生物物种数据和环境因子数据进行对应分析。水生生物物种数据采用物种数及生物密度数据,利用 $\lg(x+1)$ 进行数据的转换和处理,使之更趋于正态分布^[12]。

3 结果与分析

3.1 流域水生态系统空间异质性特征

根据野外调查及实验室水生生物样品鉴定,对黑河流域水生生物种类、数量及优势物种特征进行了整理分析。经统计整理,黑河流域调查到浮游植物 8 门 98 属 231 种,其中,硅藻为流域广布种,占总浮游植物物种数 42.42%。尺骨针杆藻(*Synedra ulna* (Nitzsch.))、膜孔平板藻(*Tabellaria fenestrata*)和无常蓝纤维藻(*Dactylococcopsis irregularis*)为流域内浮游藻类的优势种。黑河流域调查到浮游动物 4 门 44 种,其中,原生动物为流域优势类群,共计 20 种,占流域总物种数 45.45%。黑河流域调查到底栖动物 5 门 17 种,其中,水生昆虫为流域的优势类群,共 11 种,占总物种数 64.71%。黑河流域共调查到 19 种鱼类,其中,野生种类 13 种,主要以鲤科

和高原鳅为主;人工养殖鱼类 6 种,人工养殖鱼类主要分布于水库、人工池塘或湖泊等水体。

利用 ArcGIS 空间分析与处理技术,对黑河流域各个采样点调查到浮游植物、浮游动物、底栖动物和鱼类等水生生物的种类数或物种密度数据,进行空间化处理,得到黑河流域水生态系统空间异质性特征(图 2)。可以看出,黑河流域水生态系统空间分布上具有流域中上游地区物种数量相对较多,而下游区域相对较少的特点。

3.2 环境因子及其影响特征分析

3.2.1 环境因子及其生态表征 影响流域水生态系统空间异质性的流域环境因子是多方面的,具有多样性和复杂性的特点^[13-15]。为分析不同环境因子对于流域水生态系统的作用关系,需要构建影响流域水生态系统异质性的环境因子指标体系。结合黑河流域以往开展的生态功能区划、自然地理区划以及河流功能区划等区划指标,以及黑河流域干旱区流域的特点,从气象气候、地形地貌、水文、植被等方面,建立了影响流域水生态特征的指标体系,主要包括多年平均降水量(P)、多年平均气温(T)、多年平均蒸发量(E)、多年平均干旱指数(D)、平均径流深度(R)、绝对高度(DEM)、相对高度、坡向($ASPECT$)、坡度($SLOP$)、净初级生产力(NPP)、植被指数($NDVI$)等,共 11 个指标。通过对各指标的作用特点分析^[20-21],概括出不同环境因子对于水生态系统的生态表征特征(表 1)。

3.2.2 环境因子相互作用关系分析 为识别各个环境因子之间的相互作用关系,在对各个指标进行标准化处理后,采用探索性空间相关分析中的相关性分析(CA)方法,判别影响黑河流域水生态系统异质性的各个环境因子之间的作用特征。由相关分析结果可以看出,各个环境因子指标中,绝对高度与相对高度、径流深度、平均降水量、 NPP 、 $NDVI$ 以及坡向、坡度之间呈现正相关性,尤其绝对高度与相对高度之间高度相关,相关系数高达 0.99 以上;而绝对高度与平均气温、平均蒸发量和干旱指数之间,则表现为较为明显的负向相关性,相关系数分别为 -0.84、-0.89、-0.79。

采用空间主成分分析方法进一步探索各个环境因子之间的作用关系。利用 ArcGIS 空间分析技术,通过环境因子指标的主成分因子变换,得到影响黑河流域水生态系统的主成分因子特征值及贡献率(表 2)。

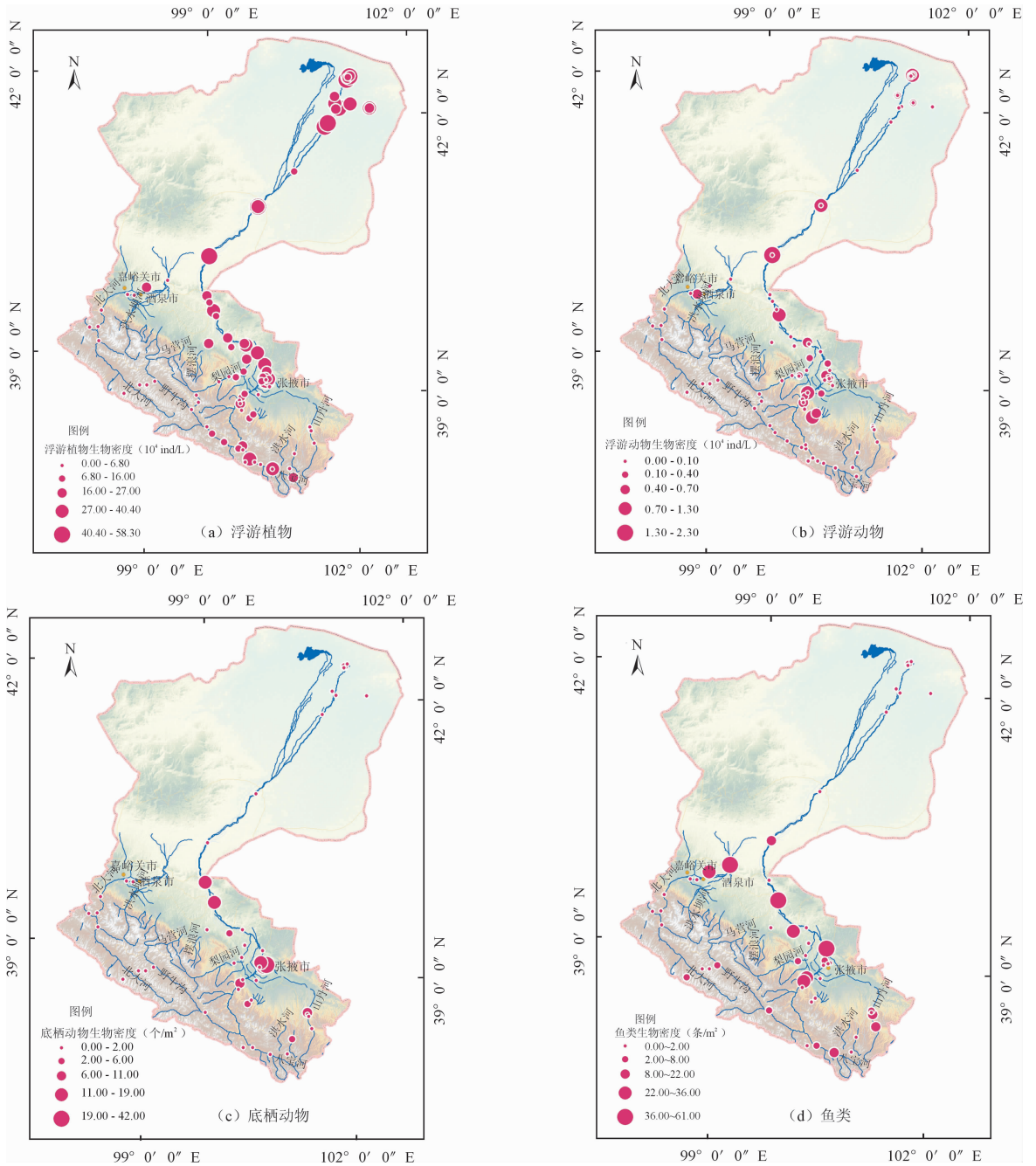


图2 水生态系统空间异质性特征(生态密度)

表1 流域水生态系统主要环境影响指标及其生态影响特征

序号	影响因子	生态影响及表征特征
1	降水量	是水生态系统赖以生存的重要物质条件和生命过程的载体,影响生态过程
2	径流深	表征水资源空间分布差异,影响物质循环及水生态系统空间分布
3	气温	不同气温特征下,形成不同的热量条件,从而影响水生态系统分布格局
4	蒸发	通过水循环过程环节,影响河流水生态系统水文变化过程
5	干旱指数	影响水生态空间分布格局,是干旱区域水分条件差异性的特征性指标
6	绝对高度	是水生态系统产生垂直地带性空间异质特征分异的主要影响因子
7	相对高度	同海拔高度,是区域垂直地带性特征差异指标的另一种表达方式
8	坡度	不同坡度条件及河流形态特征,对于水生态演变及分布格局带来影响
9	坡向	不同坡向条件下造成接收太阳辐射有所不同,影响水生态形态分布格局
10	<i>NPP</i>	可反映出不同水分条件差异下植被生产能力的差别
11	<i>NDVI</i>	反映不同水分等条件差异下,植被覆盖度在空间上的差异化分布

表 2 流域环境因子主成分因子特征值及贡献率

主成分(PC)	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11
降水(X_1)	0.075	-0.107	0.016	0.946	0.034	-0.007	0.256	-0.145	-0.025	-0.003	-0.003
径流深(X_2)	0.030	0.013	-0.007	0.261	-0.092	0.062	-0.943	-0.013	0.168	0.009	0.007
气温(X_3)	-0.001	-0.001	0.001	-0.004	0.001	-0.002	0.016	-0.023	0.045	0.998	0.014
蒸发(X_4)	-0.347	0.928	0.004	0.123	0.023	0.000	0.041	0.012	0.039	-0.001	0.000
干旱指数(X_5)	-0.012	0.342	-0.005	0.023	-0.039	0.014	-0.162	-0.022	-0.982	0.046	0.056
绝对高度(X_6)	0.661	0.249	-0.010	-0.034	-0.045	0.703	0.066	0.010	0.003	0.001	0.000
相对高度(X_7)	0.661	0.250	-0.024	-0.021	0.049	-0.705	-0.034	0.003	-0.004	0.001	0.000
坡度(X_8)	0.010	-0.014	0.209	-0.014	0.970	0.070	-0.099	-0.004	-0.023	0.002	-0.002
坡向(X_9)	0.021	0.010	0.977	-0.013	-0.208	-0.024	0.009	0.001	0.001	-0.001	0.000
$NPP(X_{10})$	0.001	-0.003	0.000	0.000	0.005	-0.001	0.016	0.006	0.053	-0.017	0.998
$NDVI(X_{11})$	0.007	-0.029	0.002	0.141	0.007	-0.005	0.020	0.989	-0.023	0.024	-0.005
特征值	998809.1	26543.7	5420.5	1099.28	433.6	224.24	184.07	60.65	13.65	0.64	0.093
贡献率/%	96.70	2.60	0.50	0.10							
累计贡献率/%	96.70	99.30	99.80	99.90							

由表 2 可知,前 2 个主成分(第一主成分 PC1 和第二主成分 PC2)的累积贡献率为 99.3%,已综合了各环境因子的绝大部分信息。其中,第一主成分 PC1 与绝对高度(X_6)、相对高度(X_7)存在较大的正相关性(0.661),而指标绝对高度(X_6)与相对高度(X_7)是黑河流域地形特征信息的表征性指标,因此第一主成分 PC1 可以看作是流域地形特征的代表。第二主成分 PC2 与平均降水量之间具有一定负相关关系(-0.107),而与平均蒸发量(X_4)具有较强正相关性(0.928),与干旱指数(X_5)具有一定的正相关(0.342),而指标平均降水量(X_1)、平均蒸发量(X_4)和干旱指数(X_5)均作为黑河流域气候特征信息的表征性指标,因此第二主成分 PC2 可以看作流域气候特征的代表。由此可知,地形要素指标和气候要素指标对于黑河流域水生态系统空间异质性分布具有较大的影响。

地形因子中,流域绝对高度与相对高度之间具有极强的正相关关系,可任选其一作为地形因子的表征指标,在此选取绝对高度(DEM)作为黑河流域地形特征的表征指标。气候因子中,流域的降水量(P)与蒸发量(E)、干旱指数(D)之间呈较明显的负相关关系,而蒸发量(E)与干旱指数(D)之间具有一定正相关性,为减少信息冗余,在蒸发量(E)和干旱指数(D)中可选择其中之一,考虑到干旱指数(D)反映出西北黑河流域干旱缺水的内陆流域特点,因此将降水量(P)、干旱指数(D)作为黑河流域的气候表征指标。

3.3 水生态系统异质性主要环境影响要素

利用数量排序反映物种在分类学性状上的差异,明确物种在多个环境梯度上的空间位置,是生态学上的每一物种在超体积生态位的 n 维空间中都由其特定的位置特性所决定。因此,通过排序手段识别物种分布与生态环境之间的关系,能够很好地揭示它们在不同环境因子(非生物的和生物的)上的生态分化现象^[16]。典范对应分析(CCA)排序除了能够反映不同物种的生态分化现象以外,还可以很好地解释物种与环境之间的内在联系。

利用 CCA 分析,将黑河流域水生态系统各样点数据与环境因子指标进行排序,得到环境因子二维排序图(图 3),通过排序轴可知,影响黑河流域水生态系统空间异质性特征的各个环境因子中,海拔高度、降水量和干旱指数是 3 个影响流域水生物物种数量及分布的主要环境变量,该情形也与环境因子主成分分析(PCA)的结果相一致。由此判断,地形因子(DEM)、气候因子(降水、干旱指数)是干旱区黑河流域水生态系统宏观空间格局分异的主要环境影响要素。

4 讨论

研究表明,流域水生生物群落空间异质性的直接驱动因子为水量和水质条件,这些因子的差异也主要体现在流域水体的局部特征上。对于黑河流域而言,浮游植物和浮游动物等水生生物种类分布主要以中游地区居多,与黑河中游地区河道变宽、水流

变缓、泥沙易于沉积以及人类活动导致水体中具有较多营养物质有关^[17]；而且，黑河中游区域广泛分布湿地水生维管束植物(中游分布有张掖湿地国家级自然保护区)，具有适合水生生物生长的栖息生境^[18]。其他研究如太子河流域，着生藻类群落结构也具有明显的空间异质性，驱动着生藻类结构空间格局的水环境因子为总氮(TN)、电导率(EH)和总溶解固体(TDS)，但研究同时指出，由于流域不同的土地利用模式、外源性营养盐类型以及人类活动强度等差异，致使河流着生藻类群落结构格局有所不同^[19]。在太湖流域大型底栖动物群落结构的环境影响因子中，电导率(EH)和总氮(TN)是影响底栖动物空间分布的主要环境因子^[20]。巢湖流域浮游植物群落的空间分布结构，主要受到水温、浊度及入湖水量因子等变化的影响。

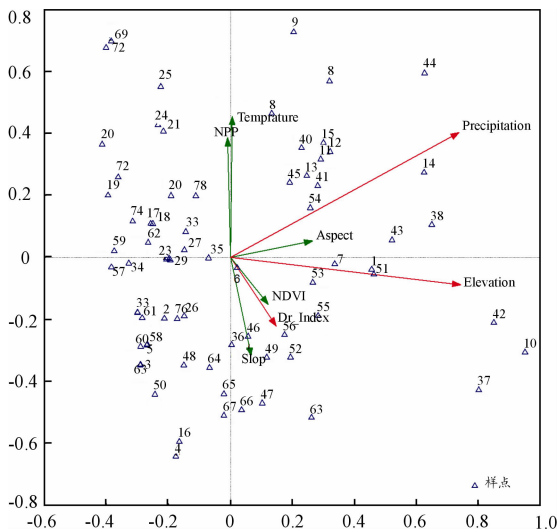


图3 水生态样点环境因子典范对应(CCA)二维排序

而流域水生态系统的结构和功能特征受到不同尺度上多个环境因子的综合作用，在河流或河段尺度上，河道动力学、栖息地特征和生境条件、水质和水量差异等往往是造成水生态系统异质性的主要环境影响要素。但是，在宏观尺度上，区域气候和地质条件素通常具有决定性作用，致使流域水生态系统出现宏观的空间分布格局差异^[1]，且宏观尺度上的环境要素具有长期而稳定(数百年或者数年前)、作用范围广(大于几十平方公里)的特点。实质上，流域的水生态系统的空间异质性分布格局，除了直接与河流等水体环境的物理化学条件息息相关以外，宏观尺度上的流域环境要素(地形、地质、气候、土壤等)通过对河流生物栖息环境的直接或间接作用(如降水变化、营养物质输移、底质条件改变、河

流形态变化等)，也会影响河流水生态系统的空间分布，使之出现鱼类等水生生物区系、种类及数量等水生态系统的空间异质性分布特征。

5 结语

(1)黑河流域浮游植物、浮游动物、底栖动物及鱼类等水生生物主要分布在中游区域，与黑河中游地区河道变宽、流速变缓、泥沙易于沉积以及水体中具有较多营养物质等因素有关，而上游地区由于祁连山山体高差较大、山势陡峭、河流流速相对较大，水生生物种类密度相对较小。下游地区则由于受到阿拉善高原极端少雨、下游河道经常断流等影响，水生生物物种种类和生物密度则相对更少。

(2)影响黑河流域水生态系统分布格局的环境因子指标中，绝对高度与相对高度、径流深度、平均降水量、NPP、NDVI以及坡向、坡度之间表现为正相关关系；而绝对高度与平均气温、平均蒸发量和干旱指数之间，则具有较为明显的负向相关性，相关系数分别为 -0.84 、 -0.89 、 -0.79 。

(3)黑河流域环境因子指标相互作用关系分析及指标空间主成分分析(PCA)表明，第一主成分PC1和第二主成分PC2累积贡献率已经超过99%，综合了各环境因子的绝大部分信息。其中，第一主成分PC1可作为流域的地形特征(海拔高度)的代表，第二主成分PC2可作为流域气候特征(降水量、干旱指数)的代表。CCA分析结果也同时表明，海拔高度、降水量和干旱指数是影响黑河流域水生物物种数量及分布的主要环境变量，是流域水生态系统宏观空间格局分异的主要环境影响要素。

参考文献:

- [1] 孟伟,张远,郑丙辉. 辽河流域水生态分区研究[J]. 环境科学学报,2007,27(6):911-918.
- [2] Allan J D, Castillo M M. Stream ecology: structure and function of running waters (2nd edition) [M]. Springer, Dordrecht, 2007.
- [3] Hauer F R, Lamberti G A. Methods in Stream Ecology [M]. Manhattan: Academic Press,2007.
- [4] Lampert W. The ecology of lakes and streams [M]. (Second Edition) Oxford University Press, New York, 2007.
- [5] 陈静生. 河流水质原理及中国河流水质 [M]. 北京:科学出版社,2006.
- [6] 郑丙辉,田自强,李子成. 黑河流域土地覆盖变化与生态环境退化过程分析[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(1):62-66.

(3)通过模拟得到了鼓泡塔中心($y = 0\text{m}$)截面不同高度处速度沿径向的分布规律,即速度呈现出抛物线分布,在水深方向越接近通气孔速度越大,波峰也越明显,且气相速度整体大于液相速度。

参考文献:

- [1] Becker S, Sokolichin A, Eigenberger G. Gas-liquid flow in bubble columns and loop reactors: II. Comparison of detailed experiments and flow simulations[J]. *Chemical Engineering Science*, 1994, 49(24): 5747-5762.
- [2] Pflieger D, Gomes S, Gilbert N, et al. Hydrodynamic simulations of laboratory scale bubble columns fundamental studies of the Eulerian-Eulerian modelling approach [J]. *Chemical Engineering Science*, 1999, 54(21): 5091-5099.
- [3] Vivek V Buwa, Vivek V Ranade. Dynamics of gas-liquid flow in a rectangular bubble column: experiments and single/multi-group CFD simulations[J]. *Chemical Engineering Science*, 2002, 57(22): 4715-4736.
- [4] 肖柏青,张法星,刘春艳,等.曝气池内气泡羽流附壁效应的试验研究[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(4): 104-107+112.
- [5] Ashraf A B, Pushpavanam S. Analysis of unsteady gas-liquid flows in a rectangular tank: Comparison of Euler-Eulerian and Euler-Lagrangian simulations [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011, 37(3): 268-277.
- [6] Sheng Y Y, Irons G A. The impact of bubble dynamics on the flow in plumes of ladle water models [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1995, 26(3): 625-635.
- [7] Pan Y, Dudukovic M P, Chang M. Dynamic simulation of bubbly flow in bubble columns [J]. *Chemical Engineering Science*, 1999, 54(13): 2481-2489.
- [8] 李光,杨晓钢,戴干策.鼓泡塔反应器内两相流动态模拟研究[J]. *化学反应工程与工艺*, 2008, 24(3): 220-227.
- [9] 苏新军.鼓泡塔出口边界条件的数值模拟[J]. *化学工程*, 2008, 36(12): 25-28.
- [10] Li Guang, Yang Xiaogang, Dai Gance. CFD simulation of effects of the configuration of gas distributors on gas-liquid flow and mixing in a bubble column [J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64(24): 5104-5116.
- [11] Deen N G, Solberg T, Hjertager B H. Large eddy simulation of the Gas-Liquid flow in a square cross-sectioned bubble column [J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(21): 6341-6349.
- [12] 魏文礼,李超.阀门附近水力特性的三维数值模拟研究[J]. *计算力学学报*, 2011, 28(1): 108-112.
- [13] Komarkova J, Komarek O, Hejzlar J. Evaluation of the long term monitoring of phytoplankton assemblages in a canyon-shape reservoir using multivariate statistical methods [J]. *Hydrobiologia*, 2003, 504(1-3): 143-157.
- [14] Robert G, Bailey. *Ecosystem Geography From Ecoregions to Sites* [M]. Springer, New York, 2009.
- [15] Stamatis Z, Alcibiades N E, Panayotis D. Ecoregions in the Southern Balkans: Should their boundaries be revised [J]. *Environmental Management*, 2009, 43(4): 682-397.
- [16] 栾青杉,孙军,宋书群,等.长江口夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 445-450.
- [17] 李鹏,安黎哲,冯虎元,等.黑河流域浮游植物及其地理分布特征研究[J]. *西北植物学报*, 2001, 21(5): 966-972.
- [18] 李鹏,李彩霞,冯虎元,等.黑河流域浮游动物及其地理分布特征研究[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2000, 36(3): 191-192.
- [19] 高欣,牛翠娟,胡忠军.太湖流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3329-3336.
- [20] 路娜,尹洪斌,邓建才,等.巢湖流域春季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 950-956.

(上接第12页)

- [7] 程国栋,肖洪浪,陈亚宁,等.中国西部典型内陆河生态-水文研究[M].北京:气象出版社,2010:3-6.
- [8] 李杰人,杨宁生,徐忠法.水产种质资源共享平台技术规范(下册)[M].北京:中国农业科学技术出版社,2008:789-875.
- [9] 张金屯.数量生态学[M].(第2版).北京:科学出版社,2011.
- [10] Komarkova J, Komarek O, Hejzlar J. Evaluation of the long term monitoring of phytoplankton assemblages in a canyon-shape reservoir using multivariate statistical methods [J]. *Hydrobiologia*, 2003, 504(1-3): 143-157.
- [11] 李晓钰,于洪贤,马成学.松花江哈尔滨段浮游植物群落典范对应分析及多样性分析[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(10): 103-107.
- [12] 石晓丹,阮晓红,邢雅因,等.苏州平原河网区浅水湖泊冬夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. *环境科学*, 2008, 29(11): 2999-3008.
- [13] Dale K S, Daniel C D, Richard A M, et al. Ecoregions and stream morphology in eastern Oklahoma [J]. *Geomorphology*. 2010, 122(1-2): 117-128.