

DOI: 10.5846/stxb201904020638

赵坤, 陈皓, 庞婉婷, 尤庆敏, 王全喜. 不同类型景观水体浮游动物群落差异及其影响因素. 生态学报, 2020, 40(6): 2149-2157.

Zhao K, Chen A, Pang W T, You Q M, Wang Q X. Characteristics of zooplankton community in different types of landscape waters and their influencing factors. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 2149-2157.

不同类型景观水体浮游动物群落差异及其影响因素

赵 坤, 陈 皓, 庞婉婷*, 尤庆敏, 王全喜

上海师范大学生命科学学院, 上海 200234

摘要: 探明不同类型景观水体中环境敏感型浮游动物群落特征差异及影响因素对景观水体生物多样性维持和水生生态系统保护十分重要。于 2014 年 5 月在上海选取具代表性的 8 个景观水体共设置 35 个采样点进行浮游动物采样调查, 并同步测定水体环境指标。本次调查采集并鉴定浮游动物 40 种, 其中轮虫 29 种, 枝角类 7 种, 桡足类 4 种。基于浮游动物群落组成进行聚类分析, 所有采样点聚为四种景观类型: 天然湖泊(淀山湖)、人工湖泊(滴水湖)、AAAA 级公园水体(共青森林公园和古猗园)和普通综合性公园水体(世纪公园、和平公园、长风公园和车镜公园)。两种公园水体浮游动物种类较为丰富, 多样性较高, 各自约有 40% 的种为生境特有种, 而淀山湖特有种仅 1 种(为猛水蚤), 滴水湖 3 种均为蛭态类。物种相似性方面, 大型天然淀山湖与人工滴水湖相似性最高(37.5%), 普通公园水体次之(33.3%), 与 AAAA 公园水体相似度最低(20%)。后两者间的相似性较高(27.8%), 且两者与滴水湖的相似度均较低(18.5%和 12.0%)。四类水体仅有 3 个共有种/类群: 角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)和桡足类无节幼体。AAAA 公园水体中甲壳纲动物的相对丰度(88.8%)远高于其他水体, 其优势种由 3 种大型浮游动物(甲壳纲)组成, 普通公园水体优势种仅由 4 种小型浮游动物(轮虫)组成, 淀山湖和滴水湖的群落结构简单, 优势种单一。冗余分析(RDA)显示, 水温、透明度、pH、化学需氧量、氨氮和总磷是影响景观水体浮游动物群落差异的显著环境因子。

关键词: 景观水体; 浮游动物; 群落类型; 环境因子

Characteristics of zooplankton community in different types of landscape waters and their influencing factors

ZHAO Kun, CHEN Ai, PANG Wanting*, YOU Qingmin, WANG Quanxi

College of Life Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China

Abstract: Identifying the differences in environment-sensitive zooplankton community characteristics and influencing factors among different types of landscape waters is critical for maintenance of biodiversity and protection of aquatic ecosystem. Zooplankton was sampled from 35 sites in 8 typical landscape waters in Shanghai and *in situ* physicochemical variables were measured in May 2014. A total of 40 species of zooplankton were recorded in the study area, of which 29 species were recorded as Rotifera, 7 species as Cladocera, and only 4 of them as Copepoda. Cluster analysis showed the zooplankton communities in all sampling sites were clustered into four groups: natural fresh-water lake (Lake Dianshan), man-made lake (Lake Dishui), waters in AAAA grade parks (Gongqing Forest Park and Guyiyuan Park), and waters in ordinary comprehensive parks (Century Park, Heping Park, Changfeng Park, and Chejing Park). Zooplankton species in the two types of park were richer, of which about 40% were endemic species. While there was only 1 endemic species (Harpacticoida) in Lake Dianshan, and three endemic species (Bdelloidea) in Lake Dishui. In terms of species similarity, the natural Lake Dianshan had the highest similarity (37.5%) with the man-made Lake Dishui, followed by ordinary parks

基金项目: 2013 年度上海市政府发展研究中心——上海师范大学研究基地专项课题(2013-YJ-C08); 中国博士后科学基金(2019M661574)

收稿日期: 2019-04-02; **网络出版日期:** 2019-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pangwt@shnu.edu.cn

(33.3%), and AAAA grade parks (20%). The species similarity between the latter two was higher (27.8%), while Lake Dishui had a lower similarity with the latter two (18.5% and 12.0%). There were only three taxa (*Brachionus angularis*, *Keratella cochlearis* and Copepoda nauplii) detected in all types of waters. The relative abundance of crustaceans in waters of AAAA grade park (88.8%) was much higher than that in other waters. The dominant species in waters of AAAA grade parks were composed of three large-size zooplankton species (crustaceans). The dominant species in waters of ordinary comprehensive parks were composed of four small-sized zooplankton species (rotifers). The community structures in both Lake Dianshan and Lake Dishui were simple. Redundancy analysis showed water temperature, transparency, pH, and chemical oxygen demand were significant factors affecting zooplankton community structure in landscape waters.

Key Words: landscape waters; zooplankton; community types; environmental factors

浮游动物在水域生态系统中起着重要的作用,其摄食显著影响初级生产者浮游植物的种群组成及丰度变化,同时也是鱼类、虾蟹等其他上层营养级有机体的宝贵食物来源。它通过食物链上行和下行效应影响食物链能量流的传递,从而影响整个生态系统的稳定。浮游动物对水环境反应灵敏,是水环境变化的重要指示生物^[1],其种类组成、现存量和优势种等的变动能及时准确地反映水域生态环境质量^[2],在环境污染监测和生态系统评估中起重要作用^[3]。目前国内外已有很多利用浮游动物进行水环境质量评估的报道^[1-8]。

景观水体是指天然形成的或人工建造的供人们欣赏的大小湖泊、河道等。此类水体容易受人为活动的影响而出现不同程度的富营养化,称为人为富营养化^[9,10]。景观水体富营养化会使得生活于其中的、对环境敏感的浮游动物产生强烈响应而使得群落结构发生改变,影响藻类群落的生产力、资源利用效率和经济鱼类的成活,进而影响水体生物多样性和景观的观赏价值。不同类型的景观水体在本底条件、水生动植物、人为干扰强度和自我恢复能力等方面均有所差异。本研究旨在厘清不同类型景观水体中浮游动物群落生态特征的差异性及其主要影响因素,这在景观水体生态系统的维持与管理中具有重要意义。

鉴于此,本研究在上海选取不同起源的大型景观湖泊(天然湖泊和人工湖泊)和不同观赏价值和管理强度的公园小型水体(AAAA级公园和普通综合性公园中的水体),于2014年5月(春季)进行浮游动物样品采集和水体环境指标测定。基于浮游动物群落组成数据对所有调查水体进行聚类分析,对比不同类型景观水体中浮游动物群落结构特征及差异。并基于群落数据的去趋势分析(Detrended correspondence analysis, DCA)结果(轴长均小于3),选用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)找出造成群落差异性的关键影响因子,为景观水体生物多样性维持、环境质量的保护和可持续发展提供科学的基础资料和建议。

1 研究方法

1.1 样点设置与采样时间

本研究在上海不同起源的大型景观湖泊(天然湖泊和人工湖泊)和不同观赏价值和管理强度的公园小型水体(AAAA级公园和普通综合性公园水体)中共选取8个景观水体并设置35个采样点,每个水体按均匀性原则布设3—9个采样点不等,以确保采样点可以代表整个水体的状况。各水体的位置如图1所示,水体特征及采样点设置情况见表1。本研究于2014年5月18日—28日(春季)的晴天或多云天气(10:00—16:00)进行浮游动物标本采集和水体环境指标测定。

1.2 样品采集和处理方法

用25号浮游生物网(孔径64 μm)拖取采集定性样品,现场用4%的甲醛溶液固定,种类鉴定参照相关分类学工具书进行^[11-13];定量样品采集和室内样品处理均严格按照《湖泊富营养化调查规范》^[14]进行。室内镜检计数,尽可能地鉴定到最小分类单位,并分别换算出轮虫、桡足类和枝角类的丰度。水体环境指标水温(WT)、溶解氧(DO)、电导率(SpCond)、总溶解性固体(TDS)、盐度(Sal)、酸碱度(pH)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)使用YSI便携式多参数水质测量仪进行现场测定,水体透明度(Transparency)用塞氏盘测定,化学指标如总氮

(TN)、总磷(TP)和化学需氧量(COD_{Mn})使用分光光度法测定,氮磷比(N:P)由 TN/TP 计算得出。

表 1 所选景观水体特征及采样点设置

Table 1 Characteristics of selected landscape waters and sampling sites

景观水体类型 Types of landscape waters	水体选取及采样点设置 Waters and sampling sites	水体特征 Characteristics of waters
天然湖泊 Natural lakes	淀山湖 DianSH-1—DianSH-9	上海最大的天然淡水湖,水域面积 62 km ² ,深度大,与外界水联通,周边人为活动大干扰因素多,水系复杂,水生植物种类多,水生高等动物丰富
城市景观人工湖 Urban artificial landscape lakes	滴水湖 DSH-1—DSH-5	国内最大的城市景观人工湖,水域面积 5.56 km ² ,最深 6.2 m,较多硬制驳岸,与外界水联通,人为活动较少,水系简单,水生植物少,水生高等动物多
AAAA 级公园水体 Waters in AAAA grade parks	共青森林公园 GQSL-1—GQSL-4 古猗园 GYY-1—GYY-3	人工湖,水域面积均<0.2 km ² ,浅水水体,环境封闭,种植水草多,人流量大,人为活动多,清洁工作好,水生高等动物很少
普通综合性公园水体 Waters in ordinary comprehensive parks	长风公园 CF-1—CF-4 和平公园 HP-1—HP-3 世纪公园 SJ-1—SJ-4 车镜公园 CJ-1—CJ-3	人工湖,水域面积均<0.2 km ² ,环境封闭,人为干扰多,水生植物和高等动物均较少

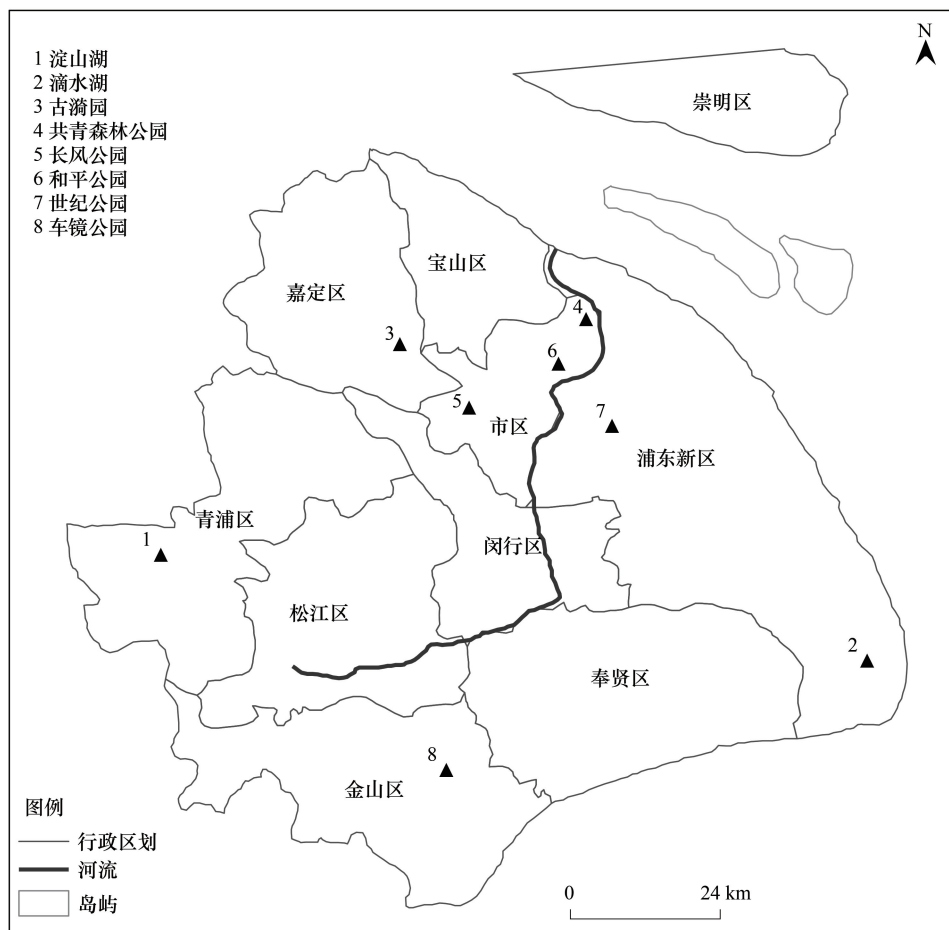


图 1 在上海选取的 8 个景观水体的位置图

Fig.1 Locations of eight selected landscape waters in Shanghai

1.3 数据分析

物种的优势度(Y)计算公式为: $Y = \frac{n_i}{N} f_i$; 式中 N 为该水域出现的所有浮游动物种类的总个体数; n_i 为第 i 种的个体数; f_i 为该种在各样点出现的频率。当 $Y \geq 0.02$ 时, 表明该种浮游动物为优势种^[15]。

多样性指数主要采用 Shannon-Wiener 生物多样性指数(H')和 Simpson 多样性指数(D):

$$H' = - \sum \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N}; D = 1 - \sum \left(\frac{n_i}{N} \right)^2$$

式中, n_i 为该种浮游动物的密度; N 为浮游动物的总密度。

每个水体浮游动物平均丰度用该水体所有样点浮游动物丰度的平均值和标准误表示。采用单因素方差分析比较不同水体间群落各指数的差异性。

于所有调查的水体中, 每两两水体间的物种相似性系数(S)采用计算公式:

$$S = \frac{n}{T} \times 100\%$$

式中, n 为两水体的共有种类数, T 为两水体中的总种类数。

采用 R 软件基于浮游动物群落物种组成及丰度对各水体采样点的群落进行聚类分析, 以探究不同类型景观水体中浮游动物群落类型是否存在差异。选取浮游动物主要优势种及所有标本和所有测得的水体环境指标, 使用前向选择(Forward selection)从中选取影响显著的环境因子, 通过主成分分析(DCA)的轴长确定使用线性模型——冗余分析(RDA), 来揭示造成不同类型景观水体中群落差异的主要环境因子。用到的程序包有 vegan 和 packfor。

2 结果

2.1 景观水体浮游动物丰度

此次调查共记录浮游动物 40 种, 轮虫种类数最多, 达 29 种, 枝角类 7 种, 桡足类 4 种。各个水体浮游动物平均丰度为 (4189 ± 1296) ind./L, 和平公园水体的丰度最高, 达到 (9378 ± 1176) 个/L; 其次世纪公园、长风公园和车镜公园水体的浮游动物丰度相当, 分别为 (7308 ± 2603) 个/L、 (7217 ± 444) 个/L 和 (6089 ± 1628) 个/L; 共青森林公园水体的丰度较低 (1642 ± 256) 个/L; 古猗园、滴水湖和淀山湖的浮游动物丰度均低于 1000 个/L(分别为 (839 ± 157) 个/L、 (598 ± 103) 个/L 和 (439 ± 86) 个/L)。

2.2 群落类型划分

基于浮游动物群落组成数据对所有采样点进行聚类分析, 共聚为四大类。人工滴水湖和天然淀山湖的采样点各聚为一类(两大类分别命名为滴水湖、淀山湖), 共青森林公园和古猗园聚为一类, 为 AAAA 公园水体, 长风公园、和平公园、世纪公园和车镜公园的水体聚为一类, 为普通综合性公园水体。

2.3 各类型水体浮游动物群落特征

四种类型水体中每两两水体之间的浮游动物物种相似性差异较大(表 2)。大型天然湖泊淀山湖与其他三大类型水体的物种相似性均较高, 其中与滴水湖的物种相似性最高, 达到 37.5%, 与普通公园水体的物种相似度达 33.3%, 与 AAAA 公园水体的物种相似度为 20%。两类公园水体的物种相似性较滴水湖、淀山湖高, 为 27.8%。而滴水湖与两类公园水体的物种相似性均较低, 其中与 AAAA 公园水体的相似性最低, 仅 12.0%, 与普通公园水体的相似性为 18.5%。

四种类型景观水体的浮游动物群落特征各异(表 3)。AAAA 公园水体浮游动物丰度以甲壳纲为主(88.8%), 远高于其他水体, 无节幼体优势度最高(0.52)。淀山湖与普通公园水体均以多肢轮虫(*Polyarthra* sp.) 为主, 优势度分别 0.53 和 0.43。滴水湖以疣毛轮虫(*Synchaeta* sp.) 为主(优势度 0.91)。普通公园水体和滴水湖的甲壳纲类占比很小, 前者寡污带指示种占比较大、多样性指数亦为所有水体中最高, 后者最低。两种

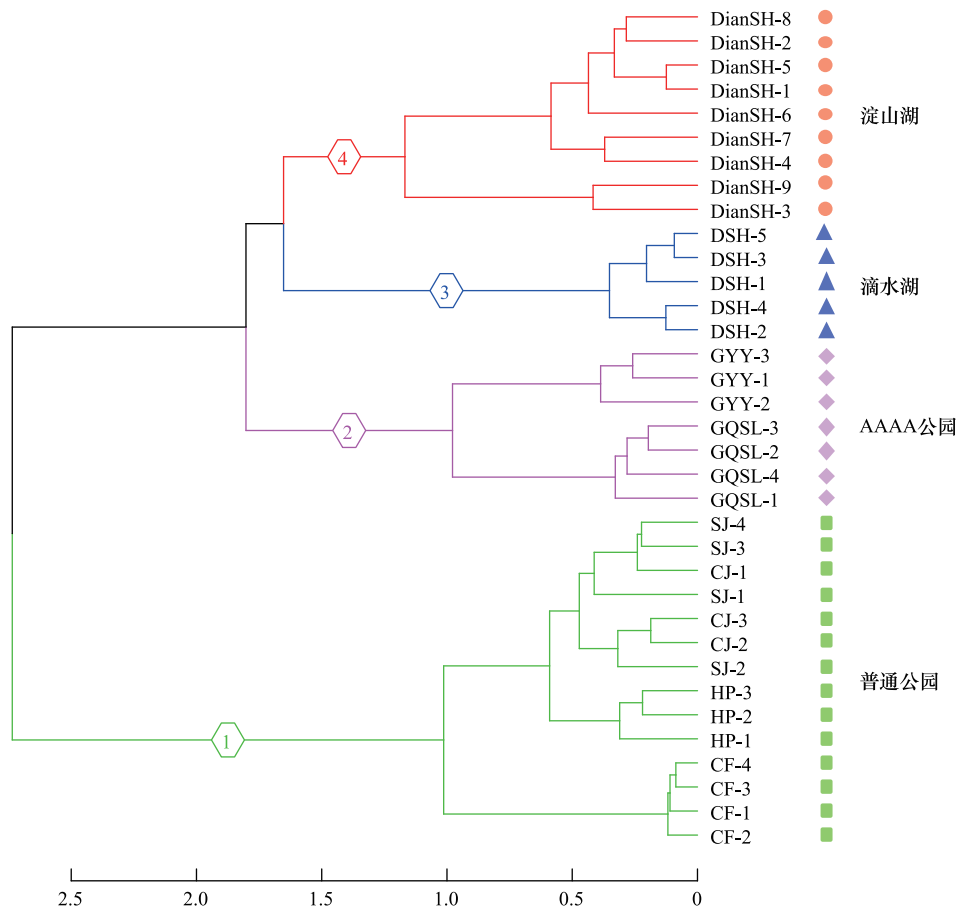


图2 景观水体浮游动物群落聚类分析

Fig.2 Cluster analysis of zooplankton communities in landscape waters

图中编号为各个水体中设置的采样点编号,详见表1中“水体选取及采样点设置”

公园水体的物种丰富度较高(25种和21种),分别有9种和10种生境特有种(即仅在此类水体中出现的种类)。特有种中的污染指示种长三支轮虫(*Filinia longiseta*)和壶状臂尾轮虫(*Brachionus urceolaris*)分别在两公园水体中丰度较高(2.68%和1.83%);滴水湖物种丰富度最低,仅7种。淀山湖15种,3种生境特有种中,轮虫属种类占比最高(8.23%)。四类水体的共有种仅3个,分别为角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)和桡足类无节幼体(Nauplii)。

表2 各类型景观水体浮游动物物种相似性系数

Table 2 Species similarity coefficients of zooplankton in different types of landscape waters

	AAAA 公园水体 Waters in AAAA grade parks	普通公园水体 Waters in ordinary parks	滴水湖 Lake Dishui	淀山湖 Lake Dianshan
AAAA 公园水体 Waters in AAAA grade parks	1	27.8%	12.0%	20.0%
普通公园水体 Waters in ordinary parks		1	18.5%	33.3%
滴水湖 Lake Dishui			1	37.5%
淀山湖 Lake Dianshan				1

表 3 各类型景观水体浮游动物群落特征

Table 3 Characteristics of zooplankton communities in different types of landscape waters

	AAAA 公园水体 Waters in AAAA grade parks		普通公园水体 Waters in ordinary parks		滴水湖 Lake dishui		淀山湖 Lake dianshan		<i>P</i>
优势种和优势度 <i>Y</i>	无节幼体	0.52	裂痕龟纹轮虫	0.26	疣毛轮虫	0.91	多肢轮虫	0.53	
Dominant species and	桡足幼体	0.04	裂足臂尾轮虫	0.02	无节幼体	0.07	无节幼体	0.14	
dominance <i>Y</i>	长额象鼻蚤	0.18	多肢轮虫	0.43					
			暗小异尾轮虫	0.15					
种类数 Species number	21		25		7		15		<0.01
生境特有种及相对丰度	方形臂尾轮虫	0.18%	晶囊轮虫	0.65%	猛水蚤	0.42%	猪吻轮虫	0.63%	
Habitat endemic species and	壶状臂尾轮虫	1.83%	剪形臂尾轮虫	0.02%			轮虫属	8.23%	
their relative abundance	尖尾鞍甲轮虫	0.18%	微小三肢轮虫	0.16%			橘轮虫	0.63%	
	盘状鞍甲轮虫	0.73%	角三肢轮虫	0.02%					
	扁平泡轮虫	0.18%	长三肢轮虫	2.68%					
	孤独异尾轮虫	0.37%	微凸镜轮虫	0.02%					
	韦氏异尾轮虫	0.18%	圆筒异尾轮虫	0.18%					
	汤匙华哲水蚤	0.18%	Bdelloida sp.	0.03%					
	点滴尖额蚤	0.18%	独角聚花轮虫	0.02%					
			网纹蚤	0.02%					
辛普森指数 Simpson(<i>D</i>)	0.48		0.61		0.18		0.53		<0.01
香浓维纳指数 Shannon(<i>H'</i>)	1.01		1.23		0.37		1.01		<0.01
甲壳纲动物相对丰度 Relative abundance of crustaceans	88.8%		0.6%		8.4%		19.0%		<0.01
寡污指示种比例 Proportion of species indicating oligosaprobity	26.7%		42.1%		0		22.2%		
寡-中污指示种比例 Proportion of species indicating α-β mesosaprobity	40.0%		26.3%		66.7%		44.4%		
中污指示种比例 Proportion of species indicating β/β-α mesosaprobity	33.3%		31.6%		33.3%		33.3%		

注:污染指示种的划分依据参考 Sládeček (1983) [5]

2.4 浮游动物与水体环境因子的关系

2.4.1 各类型水体环境因子

环境因子在各类型水体之间表现出明显差异(表 4)。两类公园水体的 WT、DO 和 TP 明显高于滴水湖和淀山湖。滴水湖的 SpCond 及其相关因子(TDS、Sal)和 Transparency 远高于其他三类水体,分别为 2.1 mS/cm、1.4 g/L、1.0‰和 135 cm,而 COD_{Mn}较其他水体低,为 13.2 mg/L,普通公园水体的 COD_{Mn}远高于其他水体,达到 34.5 mg/L。淀山湖 NH₃-N、TN 和 N:P 均比其他三类水体高,分别为 0.5 mg/L、2.0 mg/L 和 13.3 mg/L。

2.4.2 造成浮游动物不同群落类型的关键影响因素

经前向选择(Forward selection, *P* = 0.01)、冗余分析的结果显示,所调查景观水体的四种群落类型主要受 WT、Transparency、pH、COD_{Mn}、NH₃-N 和 TP 六种环境因子的显著影响(图 3)。RDA 排序结果显示,第一排序轴解释率为 54.3%,第二排序轴解释率为 9.2%。其中淀山湖群落类型主要受水体 NH₃-N 浓度的影响显著,滴水湖和 AAAA 级公园水体的群落主要受透明度的显著影响,其次 NH₃-N 对上述水体的影响也较大。普通公园水体主要受 WT、COD 和 pH 的影响较显著。

表 4 各类型水体环境因子(平均值±标准差)

Table 4 Environmental factors in different types of landscape waters (mean±SD)

	AAAA 公园水体 Waters in AAAA grade parks	普通公园水体 Waters in ordinary parks	滴水湖 Lake Dishui	淀山湖 Lake Dianshan
WT/℃	24.6±2.33	25.4±1.89	21.7±0.19	20.0±0.92
DO/(mg/L)	7.6±1.00	7.7±3.78	0.3±0.01	0.3±0.05
SpCond/(mS/cm)	0.5±0.03	0.5±0.12	2.1±0.01	0.6±0.04
TDS/(g/L)	0.4±0.03	0.3±0.08	1.4±0.00	0.4±0.03
Sal/‰	0.3±0.03	0.2±0.06	1.0±0.01	0.3±0.02
pH	8.4±0.19	8.4±0.76	8.4±0.03	8.5±0.19
NH ₃ -N/(mg/L)	0.2±0.14	0.1±0.06	0.1±0.01	0.5±0.09
Transparency/cm	62.1±8.59	40.7±12.38	135.0±5.00	67.1±32.81
COD _{Mn} /(mg/L)	23.6±12.21	34.5±20.62	18.2±3.27	20.9±8.96
TN/(mg/L)	1.2±0.89	1.4±0.64	1.1±0.33	2.0±0.42
TP/(mg/L)	0.8±0.1	0.6±0.23	0.3±0.03	0.2±0.03
N:P	1.4±0.96	2.6±0.97	3.4±0.95	13.3±4.30

注:WT: 水温 Water temperature; DO:溶解氧 Dissolved oxygen; SpCond: 比电导率 Specific conductivity; TDS: 总溶解性固体 Total Dissolved Solids; Sal: 盐度 Salinity; pH: 酸碱度 Potential of hydrogen; NH₃-N: 氨氮 Ammonia nitrogen; Transparency: 透明度 Transparency; COD_{Mn}: 化学需氧量 Chemical oxygen demand; TN: 总氮 Total nitrogen; TP: Total phosphorus 总磷; N:P: 氮磷比 Ratio of nitrogen to phosphorus

3 讨论

3.1 各类型水体浮游动物群落特征差异性

基于浮游动物群落组成对所选取的 8 个景观水体所有采样点的群落进行聚类分析,共划分为四种群落类型。其中,大型天然湖泊淀山湖与其他三类水体的浮游动物种类相似度高,与同样水域面积较大的滴水湖的种类相似度高,两类公园小型水体的种类相似度高。这可能与不同水体间的环境相似度有关^[16]。例如春季在相同的天气条件下,小型水体相对于大型水体的水温上升快,溶解氧比例也相对高,两类公园小型水体的水温和溶解氧均高于水域面积较大的淀山湖和滴水湖,有机质(COD_{Mn})和总磷浓度也高于淀山湖和滴水湖。一些喜温种类或喜有机质种类则会出现在两类公园小型水体中,导致两种小型水体的物种相似度高,同理,大型湖泊淀山湖和滴水湖的物种相似度高。

四种类型景观水体中优势种结构各不相同。淀山湖和滴水湖的浮游动物优势种较两类公园水体单一,特别是滴水湖,优势度集中在单个优势种(疣毛轮虫 $Y = 0.91$),种类丰富度很低,多样性指数远低于其他三类水体,浮游动物丰度也很低,这可能与鱼类对浮游动物的捕食作用^[17]有关。滴水湖每年都会投放 5—6 万斤鱼苗(数据来自南汇水文局),并且禁止捕捞,这对于滴水湖这个面积的水体来说,上层营养级滤食性鱼类的数量是非常大的,会引起浮游生物多样性和丰度明显降低而造成群落结构单一。而普通公园水体中,水生高等动物相对少,人为活动造成水体营养丰富,浮游动物既有丰富的藻类饵料、又有较小的来自上层营养级的捕食压力,因此普通公园水体中浮游动物种类最为丰富,优势种较多样化,其多样性指数也是四类水体最高的,群落结构较为复杂。AAAA 公园水体的优势种类都是甲壳纲动物,甲壳纲动物丰度所占比例非常高,可能由于该水体中种有大量水生高等植物^[18],使水体环境条件及水生生物区系组成有较大变化。一方面,水生高等植物具有吸附颗粒物、净化水体的作用,而甲壳纲动物尤其是枝角类恰恰喜生活在较清洁水体中;另一方面,水生高等植物可以为容易成为捕食对象的浮游甲壳纲动物提供遮蔽场所,有效躲避上层营养级——鱼虾类的捕食^[19],从而造成以甲壳纲动物为主的浮游动物群落。

3.2 影响浮游动物的关键环境因子

冗余分析显示,在所有测得的环境因子中,水温、透明度、pH、化学需氧量、氨氮和总磷对浮游动物群落的

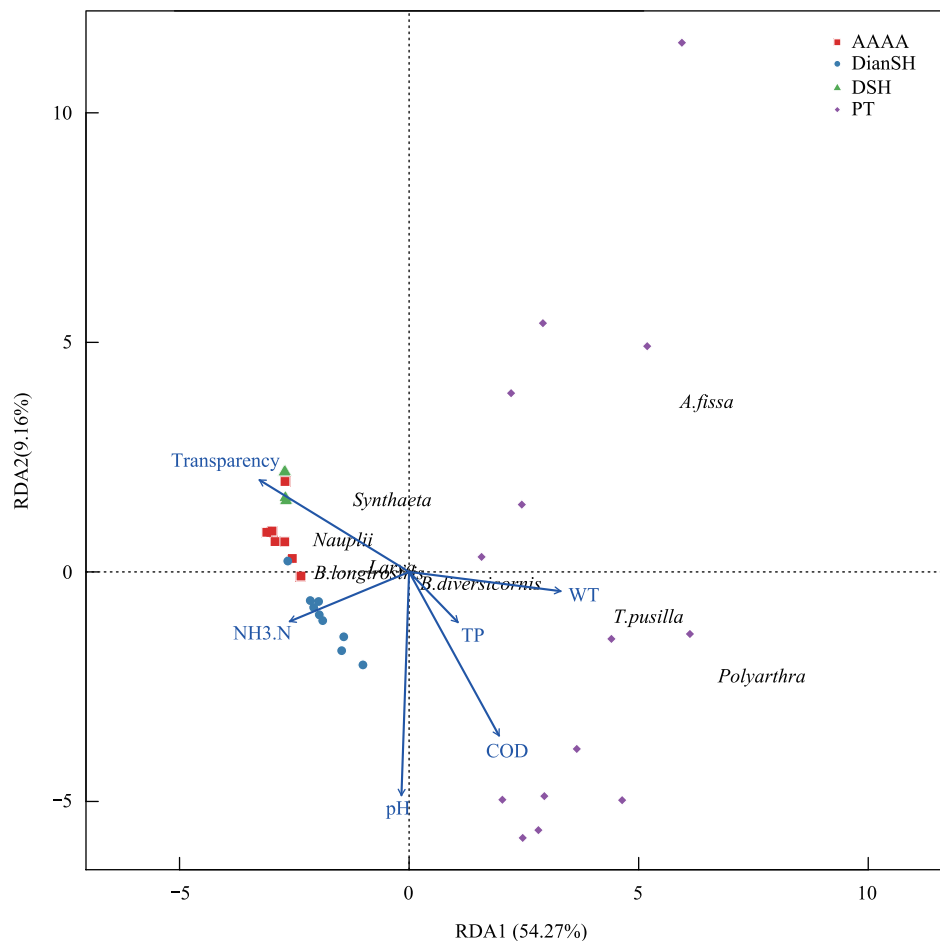


图3 各类型浮游动物群落与水体环境因子的 RDA 排序图

Fig.3 Constrained redundancy analysis of zooplankton communities and environmental factors

四种水体类型:AAAA:AAAA 公园水体 DianSH:淀山湖 DSH:滴水湖 PT:普通公园水体; 主要优势种:*A. fissa*:裂痕龟纹轮虫;*B. diversicornis*:裂足臂尾轮虫 *Polyarthra*:多肢轮虫 *Synchaeta*:疣毛轮虫 *T. pusilla*:暗小异尾轮虫 Larva:桡足幼体 Nauplii:无节幼体 *B. longirostris*:长额象鼻溞

影响较为显著,与其他研究得出相关结果一致^[20-22]。

温度一直被认为是影响浮游动物群落结构的重要环境因子之一^[20,23-24]。本研究也显示在所测得的水温范围内,水温与公园小型水体中浮游动物关系较为显著。虽然本调查的样品采集均在5月份(春季)进行,同一气象温度下的不同水体的温度却有所差异,这是由水体面积大小、位置不同所致。一方面,两大类公园水体水域面积远小于滴水湖和淀山湖,在春季同一气象温度下公园小型水体升温更快;另一方面,公园多靠近城市,城市下垫面硬质化比例较高,热岛效应也会导致水温较远郊水体高。滴水湖和AAAA级公园水体的浮游动物群落则主要受水体透明度的显著影响。滴水湖中放养大量鱼类对浮游动、植物和其他颗粒性食物的摄食量非常大,使得湖中浮游植物的生物量和颗粒物含量很低^[25],从而水体透明度则较高。AAAA级公园水体虽然受人为活动影响较大,但水中种植有较多水草,有一定净化水体的作用,AAAA级景区的水体清洁工作较好,其水体透明度也较高。淀山湖浮游动物群落主要受氨氮影响显著,湖泊周边农业面源污染较严重^[26],加之畜禽粪尿、生活污染和地表径流的贡献,使其氨氮浓度较其他类型的水体高。

4 结论

本研究评估了上海几种不同类型景观水体中浮游动物群落特征及其影响因素,天然湖泊淀山湖、人工湖泊滴水湖、AAAA级公园水体和普通综合性公园水体四种类型的水体分别为四种不同的浮游动物群落类型,

其在物种多样性、物种相似度、甲壳纲相对丰度、优势种、生境特有种等方面均有差异。水温、透明度、pH、化学需氧量、氨氮和总磷是造成不同类型景观水体浮游动物群落差异的关键环境因子。在景观水体的管理与维持中,高等水生植物的种植量、高等水生动物的放养量、水体周边面源污染和人为清洁强度等因素均会造成浮游动物群落组成的很大差异。本研究为景观水体生物多样性维持、环境质量保护和治理方案提供科学依据。

致谢:感谢上海师范大学藻类与环境研究室对样品采集和理化指标测定提供的支持。

参考文献 (References):

- [1] Gulati R D. Zooplankton and its grazing as indicators of trophic status in Dutch lakes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1983, 3(3/4): 343-354.
- [2] 吴利, 冯伟松, 陈小娟, 舒凤月, 梁小民. 新疆伊犁地区夏季浮游动物群落结构特征. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 163-172.
- [3] 姜英, 姚锦仙, 庞科, 王昊, 刘松涛, 吕植. 额尔古纳河流域秋季浮游动物群落结构特征. *北京大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(6): 870-876.
- [4] Gannon J E, Stemberger R S. Zooplankton (especially crustaceans and rotifers) as indicators of water quality. *Transactions of the American Microscopical Society*, 1978, 97(1): 16-25.
- [5] Sládeček V. Rotifers as indicators of water quality. *Hydrobiologia*, 1983, 100(1): 169-201.
- [6] 李共国, 虞左明. 千岛湖轮虫群落结构及水质生态学评价. *湖泊科学*, 2003, 15(2): 169-176.
- [7] 林青, 由文辉, 徐凤洁, 俞秋佳, 余华光. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2014, 34(23): 6918-6929.
- [8] 赵坤, 吴波, 尤庆敏, 任晶, 王全喜. 长江口九段沙附近水域浮游动物时空分布及其与环境因子的关系. *安全与环境学报*, 2015, 15(5): 374-379.
- [9] 顾宗谦. 中国富营养化湖泊的生物修复. *农村生态环境*, 2002, 18(1): 42-45.
- [10] 谢雄飞, 肖锦. 水体富营养化问题评述. *四川环境*, 2000, 19(2): 22-25.
- [11] 王家楫. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社, 1961.
- [12] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志 节肢动物门 甲壳纲 淡水枝角类. 北京: 科学出版社, 1979.
- [13] 沈嘉瑞, 戴爱云, 张崇洲. 中国动物志: 淡水桡足类. 北京: 科学出版社, 1979.
- [14] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [15] Lampitt R S, Wishner K F, Turley C M, Angel M V. Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: distribution, composition and role as a food source for migrating plankton. *Marine Biology*, 1993, 116(4): 689-702.
- [16] 卢伍阳, 马增岭, 徐兆礼, 高倩. 春季我国不同纬度河口浮游动物群落变化趋势. *海洋学报*, 2016, 38(10): 83-93.
- [17] Zhao K, Wang L Z, Riseng C, Wehrly K, Pan Y D, Song K, Da L J, Pang W T, You Q M, Tian H, Liu S Q, Wang Q X. Factors determining zooplankton assemblage difference among a man-made lake, connecting canals, and the water-origin river. *Ecological Indicators*, 2018, 84: 488-496.
- [18] 陈光荣, 刘正文, 钟萍, 李金花, 燕晓雯, 刘平平. 热带城市湖泊生态恢复中水生植被、浮游动物和鱼类的关系研究. *生态环境学报*, 2007, 16(1): 1-7.
- [19] 王站付. 太湖亮河湾人工湿地修复区域浮游动物群落结构研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2012.
- [20] Ekvall M K, Hansson L A. Differences in recruitment and life-history strategy alter zooplankton spring dynamics under climate-change conditions. *Public Library of Science One*, 2012, 7(9): e44614.
- [21] 郭坤, 彭婷, 罗静波, 杨德国, 何勇凤, 柴毅. 长湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. *海洋与湖沼*, 2017, 48(1): 40-49.
- [22] 冯世敏, 吴明姝, 熊莲, 李东京, 王俊莉, 刘冬燕. 太平湖浮游动物动态演替与环境因子的相关性研究. *水生生物学报*, 2017, 41(3): 700-711.
- [23] Record N R, Pershing A J, Jossi J W. Biodiversity as a dynamic variable in the Gulf of Maine continuous plankton recorder transect. *Journal of Plankton Research*, 2010, 32(12): 1675-1684.
- [24] 高原, 李新辉, 赖子尼, 余景, 王超, 曾艳艺, 刘乾甫, 杨婉玲. 珠江三角洲河网浮游轮虫的群落结构. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 2114-2122.
- [25] Zhu W J, Pan Y D, You Q M, Pang W T, Wang Y F, Wang Q X. Phytoplankton assemblages in a newly man-made shallow lake and surrounding canals, Shanghai, China. *Aquatic Ecology*, 2015, 49(2): 147-157.
- [26] 钱晓雅. 上海淀山湖区域农业面源污染特征及其对淀山湖水质的影响研究[D]. 上海: 复旦大学, 2011.