

九寨沟风景区秋季水体硅藻的海拔梯度变化*

周晓^{1,2} 高信芬^{1**} 羊向东³ 李艳玲³

(¹中国科学院成都生物研究所 成都 610041)

(²中国科学院研究生院 北京 100049)

(³中国科学院南京湖泊与地理研究所 南京 210008)

摘要 九寨沟是著名的世界自然遗产地,水是九寨沟自然风景的灵魂,因而关于九寨沟湿地的研究极为重要。硅藻的生长和繁殖对环境极为敏感,长期作为湿地水质监测的指标。对四川九寨沟风景区内17处采样点水体中的硅藻进行了实地调查研究,经鉴定共发现113个分类单位,包括种和变种,隶属于2纲6目10科32属。脆杆藻属、舟形藻属、桥弯藻属和异极藻属常为优势属,只在长海是以小环藻属为单一优势属的群落。首次发现典型的富营养化指示种颗粒直链藻 [*Melosira granulata* (Ehr.) Ralfs]和星形冠盘藻 [*Stephanodiscus astraea* (Ehr.) Grun.]在旅游旺季出现,并在淡季消失,表明旅游对九寨沟核心景区的湖泊产生了一定的影响,而其生态系统具有较强的自我调节功能。数量统计和相关分析结果表明,硅藻细胞密度受到环境因子的综合作用而表现出与海拔显著的正相关;反映多样性的Cairns连续比较指数(SCI)普遍较高(长海除外),与海拔显著负相关,与密度极显著负相关,可以都从种间竞争得到解释;SCI不一定反映了水体水质。图2 表6 参25

关键词 九寨沟;硅藻;细胞密度;生物多样性;Cairns连续比较指数

CLC Q949.270.8 (271)

Autumn Diatom Variation in Lakes Along Altitude Gradient in the Jiuzhaigou National Park, Sichuan, China*

ZHOU Xiao^{1,2}, GAO Xinfen^{1**}, YANG Xiangdong³ & LI Yanling³

(¹Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

(²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(³Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract The Jiuzhaigou National Park in Sichuan, China is also a famous world natural heritage site. The water is the soul of the National Park and the wetland consists of 118 mountain lakes. In order to evaluate the status of the wetland, and to put forward rational advices for the wetland protection, a series of studies on the wetland were conducted. Diatom was used to monitor water quality because of its great sensitiveness to environmental changes. Based on the studies of 17 sampling sites in lakes from 2 168 m to 3 060 m in a gradient altitude in October ~ December 2007, 113 taxa of diatoms (including species and varieties) were observed. The predominant genera in most sampling sites were *Fragilaria*, *Navicula*, *Cymbella* and *Gomphonema*, but the dominant *Cyclotella* only in the Long Lake. Two eutrophication-indicating species, *Melosira granulata* (Ehr.) Ralfs and *Stephanodiscus astraea* (Ehr.) Grun., were found for the first time in the lakes of Jiuzhaigou in traveling season, and they disappeared in winter, indicating that human activities had impact on the lakes of Jiuzhaigou, and the ecological system had a strong ability to be recovered by itself. The result of statistical analysis showed that diatom cell density and altitude represented a positive relation as a result of co-effect of environmental factors. The Cairns Sequential Comparison Index (SCI), a simplified method to estimate the relative differences in biological diversity, was high except for the Long Lake, and it had negative relation with altitude and cell density, both resulted from interspecies-competition. But the SCI could not always reflect the quality of the lake water in Jiuzhaigou. Fig 2, Tab 6, Ref 25

Keywords Jiuzhaigou National Park; diatom; cell density; biodiversity; Sequential Comparison Index

CLC Q949.270.8 (271)

九寨沟国家级自然保护区位于四川省北部阿坝州九寨沟县西部(东经103° 46' ~104° 4', 北纬32° 51' ~33° 19'),于1992年被联合国教科文组织确定为“世界自然遗产”。景区内

分布着众多的高山湖泊,核心景区包括20个(组)湖泊,海拔梯度2 000~3 000 m,落差达1 000 m。九寨沟气候属川西北高原气候区中的暖温带,温和偏冷,垂直差异大,雨量较少,光能资源较丰富,湖水冷凉、清洁、透明度高^[1]。随着旅游业的发展和气候变化的影响,景区的水域不可避免地受到了一些影响^[2],如何适时、快速地监测景区水体的质量变化已成为一个亟待解决的问题。

硅藻是一类分布广泛、种类丰富的单细胞藻类植物,对

收稿日期:2008-03-18 接受日期:2008-05-12

*国家“十一五”科技支撑计划重大项目(No. 2006BAC01A15)资助
Supported by the 11th Five-year Plan Project of the National Science and Technology of China (No. 2006BAC01A15)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: xfgao@cib.ac.cn)

环境变化敏感,不同种类的适应能力各不相同,在水质监测方面具有明显的优势,在国际上作为确定水体营养水平和监测水环境变化的一个有效的生物指标已广泛使用^[2-4].九寨沟的高山贫营养性湖泊中生存了种类丰富的硅藻,2002~2004年的九寨沟综合考察对其水体的生物多样性进行了调查,提出47种藻类植物作为九寨沟水体监测的指示植物,其中39种为硅藻^[5].但是迄今为止,对九寨沟水域中硅藻的物种组成和分布规律还缺乏系统的研究.要建立快速、准确的以硅藻为指示植物的水质监测系统,首先必须要弄清楚当前九寨沟水域中硅藻的组成、分布及其影响因素.

本文对2007年秋冬季(10~12月)在九寨沟核心景区不同湖泊采集的水样中水体硅藻及其水质指标数据进行了分析,计算了对水域生物多样性具有指示作用的Cairns连续比较指数^[6],旨在了解九寨沟水域中硅藻的种类组成和多样性程度,探讨九寨沟水体中硅藻细胞密度在不同海拔的变化规律及影响因素,以期对九寨沟环境保护、监测和管理提供参考依据.

1 研究方法

1.1 采样点设置与采样时间

根据湖泊的具体分布情况,尽量保证在100 m海拔梯度内有两处采样点,我们在九寨沟核心景区的1 000 m海拔梯度范围内共选择了17处湖泊或者缓流处(图1),于2007年10月~12



图1 九寨沟采样点分布图

Fig. 1 Sampling sites in the Jiuzhaigou National Park

S1: 盆景滩; S2: 芦苇海; S3: 火花海; S4: 卧龙海; S5: 树正群海; S6: 老虎海; S7: 犀牛海; S8: 镜海; S9: 金铃海; S10: 五花海; S11: 熊猫海; S12: 箭竹海; S13: 天鹅海; S14: 草海; S15: 剑岩悬泉; S16: 五彩池; S17: 长海
S1: The Penjing Riverbed; S2: The Reed Lake; S3: The Sparking Lake; S4: The Wolong Lake; S5: The Shuzheng Lakes; S6 The Tiger Lake; S7: The Rhinoceros Lake; S8: The Mirror Lake; S9: The Golden Bell Lake; S10: The Colorful Lake; S11: The Panda Lake; S12: The Arrow Bamboo Lake; S13: The Swan Lake; S14: The Grass Lake; S15: The Sword Cliff Hanging Spring; S16: The Jade-colored Lake; S17: The Long Lake

月每月中旬进行野外采样.具体采样点参数见表1.

1.2 样品采集与处理

用有机玻璃采水器在采样点取近岸表层0.5 m处水样5 L于塑胶桶,以鲁哥试剂(Lugol's)固定,静置60 h后转移沉淀至600 mL瓶中再静置48 h,使沉淀浓缩到20~30 mL后经10% HCl和30% H₂O₂处理^[2,3],在10 mL带塞刻度离心管中定容到5 mL,用移液枪取定量的样品制成永久封片,剩下的样品加甲醛和甘油保存[样品和永久封片均保存于中国科学院成都生物研究所植物标本馆(CDBI)].

于采样的同时测定并记录大气温度、水温、pH、电导率等数据;用250 mL溶氧瓶在现场取样,加MnSO₄和KI固定后带回实验室分析溶解氧含量;再取一瓶水样带回实验室进行总碱度、Ca离子含量、总氮和总磷的分析.水质分析方法参考《水和废水监测分析方法》^[7].

1.3 样品观察与统计

使用Olympus BH-2型显微镜,在油镜下随机选取视野进行观察和统计,观察视野数多在50~100个,密度特别小的样品再增加观察的视野数,使总计数个体达到200~400个.硅藻的细胞密度根据视场面积和每张片子加取的样品量进行换算:

$$n = \frac{N_1 \times A_2}{N \times A_1 \times V \times 10000}$$

其中: n —硅藻细胞密度(10^4 个/L); N_1 —硅藻细胞计数; N_2 —视场数; A_1 —视场面积(mm^2),视场直径为0.2 mm,由刻有标准刻度的载玻片在高倍镜下测量得到; A_2 —盖玻片面积(mm^2),盖玻片为20 mm×20 mm规格; V —每片加样毫升数(mL).

对硅藻的鉴定参考《中国淡水藻志》^[8]、《中国淡水藻类》^[9]以及Krammer和Lange-Bertalot (1986~1991年)的分类标准^[10]进行.

1.4 Cairns连续比较指数计算

采用Cairns连续比较指数初步探讨不同湖泊水体的生物多样性. Cairns连续比较指数(Sequential Comparison Index, SCI)是指在每一个样品内相邻个体不同形态硅藻组分的数量与观察总个体数的比值,由Cairns和Deckson提出,公式为:

$$SCI = \frac{r}{N}$$

其中: r —组数.在镜检时,依次连续比较相邻的藻类形态(大小、形状等)个体,如后一个体与前一个体形态相同则为同一组,如不同则作为另一新组.全部计数完毕时,统计组数,即为 r 值. N —总计数个体,一般至少200个.

多样性指数反映群落中的种类数和丰富度的关系,比起种群水平上的测定如单一的指示种更能全面地反映水质状况.多样性指数应用的主要困难是要有正确的种类鉴定基础.由于硅藻在实际监测过程中难以快速并准确鉴定到种,使用SCI指数不必鉴定种类名称,仅需作形态对比,在实际监测中易于操作,其意义与多样性指数相似,可用于水体硅藻多样性的初步评估.在相同的总计数个体时,组数越多则表示多样性越大^[6].

1.5 相关分析

相关分析是指通过计算变量间两两相关的相关系数,

表1 九寨沟湖泊采样点的环境参数
Table 1 Environmental data of the sampling sites in the Jiuzhaigou National Park

采样点 Sampling site	海拔 Altitude (h/m)	水体颜色 Water color	生境 Habitat	水位变化 Change in water level
S1 盆景滩 The Penjing Riverbed	2168	淡绿色 Light green	缓流 Slowly flowing water	冬季水位略有下降; 不结冰 Dropping slightly, no icing in winter
S2 芦苇海 The Reed Lake	2178	淡绿色 Light green	缓流 Slowly flowing water	无明显水位变化; 不结冰 No obvious change, no icing in winter
S3 火花海 The Sparking Lake	2187	蓝色 Blue	静水 Still water	无明显水位变化; 严冬表层有薄冰 No obvious change, slightly icing in winter
S4 卧龙海 The Wolong Lake	2215	浅绿色 Light green	静水 Still water	无明显水位变化; 不结冰 No obvious change, no icing in winter
S5 树正群海 The Shuzheng Lakes	2250	淡蓝色 Light blue	缓流 Slowly flowing water	无明显水位变化; 不结冰 No obvious change, no icing in winter
S6 老虎海 The Tiger Lake	2298	深蓝色 Dark blue	静水 Still water	无明显水位变化; 不结冰 No obvious change, no icing in winter
S7 犀牛海 The Rhinoceros Lake	2315	湛蓝色 Blue	静水 Still water	无明显水位变化; 不结冰 No obvious change, no icing in winter
S8 镜海 The Mirror Lake	2390	蓝色 Blue	静水 Still water	无明显水位变化; 不结冰 No obvious change, no icing in winter
S9 金铃海 The Golden Bell Lake	2452	蓝色 Blue	静水 Still water	无明显水位变化; 不结冰 No obvious change, no icing in winter
S10 五花海 The Colorful Lake	2472	蓝色 Blue	静水 Standing water	无明显水位变化; 不结冰 No obvious change, no icing in winter
S11 熊猫海 The Panda Lake	2587	深蓝色 Dark blue	静水 Still water	丰水期水满溢出成瀑布, 枯水期水位下降可达5 m以上; 严冬季节封冻 In summer water spilling out and forming waterfall, in winter water level droppin and water frozen in winter
S12 箭竹海 The Arrow Bamboo Lake	2618	蓝色 Blue	静水 Still water	无明显水位变化; 严冬部分表层结冰 No obvious change, slightly icing in winter
S13 天鹅海 The Swan Lake	2905	绿色 Green	静水 Still water	无明显水位变化 No obvious change
S14 草海 The Grass Lake	2910	绿色 Green	缓流 Slowly flowing water	无明显水位变化; 不结冰 No obvious change, no icing in winter
S15 剑岩悬泉 The Sword Cliff Hanging Spring	2950	淡绿色 Light green	缓流 Slowly flowing water	无明显水位变化; 不结冰 No obvious change, no icing in winter
S16 五彩池 The Jade-Colored Pool	2995	淡蓝色 Light blue	静水 Still water	水位变化大; 不结冰 Dramatic water level change, no icing in winter
S17 长海 The Long Lake	3060	深蓝色 Dark blue	静水 Still water	年变幅值大(约8~9 m), 7~10月为丰水期; 严冬季节冰冻厚达60 cm Large annual change (about 8~9 meter); full-water season in Jul.~Otc.; ice as thick as 60 cm in winter

对两个或两个以上的变量之间的相关程度进行分析. 采用 SPSS V11.0 软件来进行二元变量的相关分析.

2 结果与分析

2.1 九寨沟湖泊水体中硅藻的科属组成

九寨沟硅藻种类丰富, 九寨沟考察报告中记录了九寨沟自然保护区的浮游和着生硅藻共有190种(含变种), 分别隶属于2纲6目9科31属^[5]. 我们在九寨沟核心景区湖泊的样品中观察到了记录的大部分种类, 共2纲6目10科32属113种(含变种)(表2).

九寨沟水体硅藻中真性浮游种类少, 附着生种类较多, 以羽纹纲的硅藻为主, 其中以无壳缝目(Araphidiales)脆杆藻科(Fragilariaceae)的脆杆藻属(*Fragilaria*), 双壳缝目(Biraphidinales)舟形藻科(Naviculaceae)的舟形藻属(*Navicula*)、桥弯藻科(Cymbellaceae)的桥弯藻属(*Cymbella*)和异极藻科(Gomphonemaceae)的异极藻属(*Gomphonema*)的

种类最多, 在各采样点均有出现, 为九寨沟水域硅藻中的优势类群, 且常成为群落中的共优种. 此外, 在11月份的S16采样点出现了大量的管壳缝目(Aulonorphidinales)窗纹藻科(Epithemiaceae)细齿藻属(*Denticula*)的细齿菱形藻(*Denticula elegans* Kütz.) (中国淡水藻类^[9]中为菱形藻科Nitzschiaceae细齿菱形藻 *Nitzschia denticula* Grun.), 成为该水体的优势种群.

中心纲的种类主要是圆筛藻科(Coscinodiscaceae)的小环藻属(*Cyclotella*). 在九寨沟大部分湖泊中, 中心纲硅藻的数量一般不占优势, 但在S17(长海)表现为极单一的小环藻属优势群落.

值得注意的是, 我们在10月和11月采集的部分水样中观察到九寨沟水体出现了典型富营养水体指示种: 圆筛藻科直链藻属(*Melosira*)的颗粒直链藻 [*Melosira granulata* (Ehr.) Ralfs] 和冠盘藻属(*Stephanodiscus*)的星形冠盘藻 [*Stephanodiscus astraea* (Ehr.) Grun.], 而12月的水样中这两个种类都没有发现(表3), 在以前的藻类植物调查^[10]和科学考察

表2 九寨沟湖泊水体中硅藻的种属组成
Table 2 Compositions of diatom species and genera in sampling sites in the Jiuzhaigou National Park

纲 Classis	目 Order	科 Family	属 Genus (种数 Species numbers)
中心纲 Centricae	圆筛藻目 Coccinodiscales	圆筛藻科 Coccinodisceae	直链藻属(1)、冠盘藻属(1)、小环藻属(5) <i>Melosira</i> (1), <i>Stephanodiscus</i> (1), <i>Cyclotella</i> (5)
	无壳缝目 Araphidiales	脆杆藻科 Fragilariaceae	等片藻属(6)、扇形藻属(1)、蛾眉藻属(2)、脆杆藻属(12)、针杆藻属(3) <i>Diatoma</i> (6), <i>Meridion</i> (1), <i>Ceratoneis</i> (2), <i>Fragilaria</i> (12), <i>Synedra</i> (3)
	短壳缝目 Raphidiales	短壳缝科 Eunotiaceae	短缝藻属 <i>Eunotia</i> (3)
羽纹纲 Pennatae	双壳缝目 Biraphidinales	舟形藻科 Naviculaceae	胸隔藻属(1)、肋缝藻属(1)、布纹藻属(1)、美壁藻属(2)、长篦藻属(1)、双壁藻属(1)、辐节藻属(1)、异菱藻属(1)、舟形藻属(15)、羽纹藻属(2) <i>Mastogloia</i> (1), <i>Frustulia</i> (1), <i>Gyrosigma</i> (1), <i>Caloneis</i> (2), <i>Neidium</i> (1), <i>Diploneis</i> (1), <i>Stauroneis</i> (1), <i>Anomoeoneis</i> (1), <i>Navicula</i> (15), <i>Pinnularia</i> (2)
		桥弯藻科 Cymbellaceae	双眉藻属(2)、桥弯藻属(23) <i>Amphora</i> (2), <i>Cymbella</i> (23)
		异极藻科 Gomphonemaceae	双楔藻属(1)、异极藻属(9) <i>Didymosphenia</i> (1), <i>Gomphonema</i> (9)
	单壳缝目 Monoraphidinales	曲壳藻科 Achnantheaceae	卵形藻属(4)、真卵形藻属(1)、曲壳藻属(5) <i>Cocconeis</i> (4), <i>Eucoconeis</i> (1), <i>Achnanthes</i> (5)
	管壳缝目 Aulonraphidinales	窗纹藻科 Epithemiaceae	细齿藻属(1)、窗纹藻属(1) <i>Denticula</i> (1), <i>Epithemia</i> (1)
		菱形藻科 Nitzschiaceae	菱形藻属(3)、菱板藻属(1) <i>Nitzschia</i> (3), <i>Hantzschia</i> (1)
		双菱藻科 Surirellaceae	双菱藻属(1)、马鞍藻属(1) <i>Surirella</i> (1), <i>Campylodiscus</i> (1)

表3 颗粒直链藻(A)和星形冠盘藻(B)在水样中的分布状况
Table 3 Distribution of *M. granulata* (A) and *S. astraea* (B) in sampling sites in the Jiuzhaigou National Park

采样点 Sampling Sites	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17
10月 Oct.	—	—	-	—	—	A	—	A	B	A	—	—	A	B	B	AB	B
11月 Nov.	A	—	-	—	B	AB	—	AB	—	AB	AB	AB	—	A	—	—	—
12月 Dec.	—	—	-	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表4 2007年10~12月不同采样点的平均硅藻细胞密度($n/10^4 L^{-1}$)
Table 4 Average diatom cell density from Oct. to Dec. 2007 at different sampling sites ($n/10^4 L^{-1}$)

采样点 Sampling Sites	10月 Oct.	11月 Nov.	12月 Dec.	平均细胞密度 Average diatom cell density
S1	22.85	25.24	74.75	40.95
S2	9.67	21.96	22.02	17.88
S3	11.66	19.04	25.48	18.73
S4	31.99	24.37	21.62	25.99
S5	10.88	10.96	17.97	13.27
S6	4.15	11.63	12.10	9.29
S7	9.18	29.66	18.02	18.95
S8	8.21	20.38	30.33	19.64
S9	5.86	15.16	13.77	11.60
S10	6.59	6.41	5.39	6.13
S11	10.79	13.73	15.04	13.18
S12	14.74	13.11	22.34	16.73
S13	33.34	49.45	24.40	35.73
S14	33.79	34.54	48.39	38.91
S15	14.11	19.82	26.75	20.23
S16	0.89	64.49	5.65	23.68
S17	95.82	64.54	54.51	71.62

报告^[5]中也没有记录。

2.2 九寨沟湖泊水体中硅藻的细胞密度

藻类的细胞密度是水域生态系统功能和水质评价的重要参数之一^[11]。在高山贫营养湖泊中,浮游藻类以硅藻占优势^[5],

水体中硅藻的细胞密度在一定程度上能反映水环境状况。

统计结果表明,九寨沟水体中硅藻细胞密度不大,多在 $10 \times 10^4 \sim 20 \times 10^4$ 个/L (表4)。各采样点之间存在差异,最大值出现在10月份的S17 (95.82×10^4 个/L),最小值出现在10月份的S16 (0.89×10^4 个/L)。一般说来,硅藻在春季和秋季会出现两个生长繁殖的高峰,使藻类数量的季节变化曲线呈现马鞍形^[11]。10~12月,月平均气温和平均水温分别为8.47、3.47、1.72 °C和8.19、7.32、5.51 °C,都逐渐降低,在大部分采样点硅藻细胞密度呈上升趋势,而3个采样点(S4、S10、S17)呈下降趋势,4个采样点(S7、S9、S13、S16)在11月硅藻细胞密度最大。

从海拔梯度的变化来看,各样点硅藻细胞密度以海拔2472 m的S10为最低点,总体上呈现先降低再上升的趋势(图2),在S6以下,各采样点硅藻细胞密度出现了比较明显的上下波动。

2.3 九寨沟不同湖泊水体的SCI值

计算结果显示,各采样点SCI值多在0.6~0.9之间(表5),平均SCI值在0.7以上,说明大部分采样点都有着较高的多样性,各个采样点之间存在的差异不大。月份最低值和平均最低值都出现在S17,说明该处多样性较低。样点S1、S3、S5、S11、S15、S16的SCI值在不同月份有比较明显的变动,其余采样点在不同月份的变化较小。

2.4 相关分析结果

相关分析能够表明两个变量之间的相关程度。根据海拔和各采样点水温、硅藻细胞密度、Cairns指数4个参数3个月的

表5 不同月份各采样点的SCI值

Table 5 SCI value at different sampling sites within three months

采样点 Sampling sites	10月 Oct.	11月 Nov.	12月 Dec.	平均值 Average value
S1	0.725	0.847	0.476	0.683
S2	0.821	0.776	0.847	0.815
S3	0.874	0.854	0.677	0.802
S4	0.771	0.782	0.894	0.816
S5	0.613	0.860	0.664	0.712
S6	0.903	0.813	0.877	0.864
S7	0.916	0.876	0.839	0.877
S8	0.857	0.773	0.828	0.819
S9	0.839	0.895	0.839	0.858
S10	0.808	0.900	0.803	0.837
S11	0.893	0.861	0.685	0.813
S12	0.850	0.848	0.832	0.843
S13	0.845	0.803	0.687	0.778
S14	0.605	0.787	0.759	0.717
S15	0.836	0.494	0.786	0.705
S16	0.909	0.455	0.531	0.632
S17	0.209	0.383	0.329	0.307

平均值来计算它们之间的Pearson相关系数(表6)。

数据显示,海拔与水温与SCI值存在显著负相关,与密度存在显著正相关;密度与SCI值存在极显著负相关。水温与密度有一定的负相关,但相关性不显著;水温与SCI值相关性不大。

表6 海拔、水温、硅藻细胞密度以及Cairns指数间的Pearson相关系数

Table 6 The Pearson correlation coefficients of altitude, water temperature, diatom density and SCI value

	海拔 Altitude	水温 Water temp.	密度 Density	Cairns指数 SCI value
海拔 Altitude	1	-0.560*	0.487*	-0.575*
水温 Water temp.		1	-0.177	0.024
密度 Density			1	-0.845**
Cairns指数 SCI value				1

*在0.05水平上相关(2尾); **在0.01水平上相关(2尾)

*Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed); **Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

3 讨论

3.1 九寨沟水体中硅藻的多样性变化

九寨沟湖泊属于高山贫营养性湖泊,硅藻植物比较丰富。包少康等在1984年的藻类调查中提出,九寨沟藻类区系的一个特点是真性浮游种类少^[1],科学考察报告中也提到这点^[5]。我们观察到的硅藻中,真性浮游主要有小环藻属、布纹藻属、细齿藻属、双菱藻属,着生种类主要是舟形藻科、桥弯藻属、曲壳藻属、短缝藻属、异极藻属。实际上,与海洋中以真性浮游藻类植物居多不同,湖泊中许多浮游藻类植物是阶段性浮游在水中的。John P. Smol等^[2]指出,偶然性浮游藻类植物在湖泊中较为常见,特别是在小型湖泊中,底栖硅藻非常丰富,它们容易脱离附着物悬浮到水体中。因此,水体中不但有真

性浮游种类,也会有偶然性浮游种类和假性浮游种类。我们虽然都在近岸处采的表层水样,但是由于各湖泊具体情况不同,有的采样点边缘为逐渐倾斜的坡面,有的地方是垂直的水体,由于受湖泊分布限制还有5处采样点选择在了较缓的溪流,水底基质的不同会对水样中浮游硅藻不同类型的比例有一定影响。因此,九寨沟硅藻植物区系的特点、各样点的环境特点以及在采样时的各种客观因素,使得我们的调查结果在总体上表现出真性浮游种类少、附着生种类较多的特点。基于此,我们在文中采用“水体硅藻”而不是“浮游硅藻”来指代水样中的硅藻。而在具体种类上,情况更为复杂。硅藻受区域大环境影响不明显,而受小水体环境影响显著^[12]。九寨沟各海子之间通过地表径流以及地下径流相连通,水体的共同特点是水色湛蓝、清澈干净、透明度高、弱碱性、钙镁离子含量高,但不同海子又有相对的独立性,具有其各自的微环境。硅藻生长受流速、水温、光照、pH、盐度、溶解氧等多种环境因素的作用,其分布是各种因素综合作用的结果,因此在不同湖泊采样点之间显现出差异来,其变化也比较复杂。

需要指出的是,长海的情况比较特殊。小环藻属通常代表了气温偏冷、水体较深较为稳定的湖泊^[13],长海(S17)是九寨沟第一大海子,海拔最高(3 060 m),水体深度大(均深44.57 m,最深88 m,其余海子均深在几米到十几米变化)。长海虽然存在明显的水位变化,但是由于其容积大,而且相对于其他海子来说远离人类活动的影响,整体上水体环境是比较稳定的。因此,小环藻属只在长海成为单一的优势群落。

颗粒直链藻常出现在各种内陆淡水中,尤其在富营养型的湖泊和池塘中大量出现^[8]。星形冠盘藻是普生性浮游种类,尤其是大量地生长在富营养型的湖泊中^[9]。许多作者把它们作为典型的富营养水体种类,指示β-中污型水体环境^[4, 11, 14-19],可见,近年来快速增长的旅游活动对九寨沟水体环境造成了一定的影响,特别是在旺季的时候达到了适于颗粒直链藻和星形冠盘藻生存的条件。当淡季到来的时候,环境的自动恢复能力使得本来不占优势的这两个种群在与其它种类的竞争中几近消失。说明九寨沟水体总体上是较清洁的,淡旺季的交替能够缓解环境压力,为环境提供自我调整恢复的时间,另一方面也显示九寨沟的环境已受到人为因素的干扰,湖泊中的硅藻物种组成发生了一定的改变。虽然环境基本保持了自然状态,但若不采取一定的整治措施,也有向富营养型湖泊发展的趋势。为了景区的持续发展,应进一步加强在旺季的管理。

3.2 九寨沟水体中硅藻细胞密度的影响因素

海拔主要影响温度,理想状况是,水温与海拔呈现极显著负相关,前面的相关分析结果也显示它们为显著负相关。如图2所示,各采样点10~12月的平均水温大致上随着海拔升高而降低,在个别样点表现出特殊的情况,如S10和S16水温较高。各样点的硅藻细胞密度与海拔的相关性显著,但与水温的相关性很小。但众所周知,海拔并不直接对密度产生影响,而主要是通过温度起作用的,密度应该表现出与水温有更大的相关性。说明除水温外,其他因素对密度的影响不可忽视,它们的作用减弱了密度与水温的相关性,而使密度与海拔的相关性增加,在结果上表现为与海拔更相关。

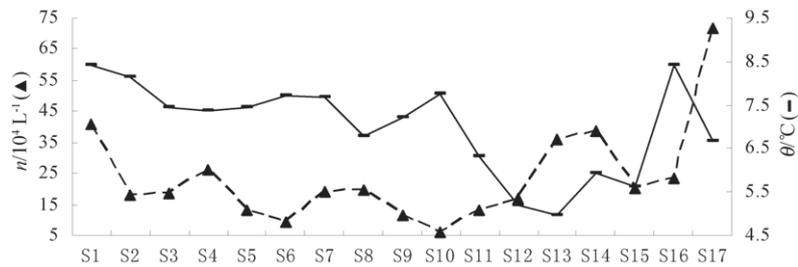


图2 2007年10~12月各采样点的平均硅藻细胞密度和平均水温

Fig. 2 Average diatom density and average water temperature from Oct. to Dec. 2007 at different sampling sites

九寨沟各水体具有相对的独立性,不同采样点的硅藻细胞密度是受各自环境中环境因子综合作用的结果.各样点理化性质分析的结果显示,各样点平均pH值的变化集中在8.05~8.2之间,最高值出现在S17(8.31),最低值出现在S10(7.68)和S16(7.94).各样点溶解氧含量的变化集中在8.63~8.94之间,最高值出现在S13(9.14),明显的低值出现在S17(8.25)、S10(7.61)和S16(7.35).较高的水温、低的pH值和溶解氧含量是影响S10采样点硅藻数量的主要因素,表现为密度最低.这3个因素同样制约了五彩池(S16)中的硅藻生长,密度一直维持在很低的水平.但是11月份时出现了大量的细齿菱形藻,使硅藻细胞密度一下达到了 64.49×10^4 个/L,超过了除S17外的所有采样点,而在12月又迅速降低至 5.65×10^4 个/L.细齿菱形藻生活在流水或较平静的淡水中,代表了当时水体环境常有流水注入或存在活动水体,大量出现显示了水体不稳定的低盐环境^[13].S16在采样点湖泊中是最小的静水海子,其容积仅为 $3.99 \times 10^4 \text{ m}^3$,有地下河道与S17相通,水位变化与S17水位变化一致,丰水期湖面一度漫过栈道,而在秋末迅速下降.11月份水位变化剧烈,储水量仅为10月份的一半,水中营养物质浓度升高,竞争力强的种类迅速繁殖,极大地影响了水体中硅藻个体数量的变动.

电导率、总碱度、Ca离子含量在各采样点的变化趋势相似,在S1~S7以及S13~S15这些样点处差异很小,S8~S11稍高,最大值在S12处,最低值在S16和S17.各样点的理化指标虽然有差异,但与硅藻细胞密度没有表现出明显的相关性,在决定细胞密度方面的作用比较小.总磷含量在各样点相差很小,对硅藻细胞密度影响小;总氮在各样点有差异,但是与密度没有显著的相关关系.

另外,在九寨沟风景区路线上分布着的3个村寨则查洼寨、树正寨和荷叶寨,人类活动都较大.则查洼寨位于诺日朗中心站往长海的方向,树正寨位于树正群海对面,荷叶寨位于芦苇海对面(图1).当地居民的生活和旅游副业的开发会对附近的环境造成一定的影响,水体小,受影响的变化表现得越明显,反映在硅藻细胞密度不太稳定的变动上.

3.3 九寨沟湖泊水体中硅藻多样性的初步探讨

我们使用比较简便的Cairns连续比较指数对2007年10~12月九寨沟湖泊水体硅藻的多样性进行了一个初步的评估.SCI的数据显示,各湖泊水体硅藻的多样性都较高,平均SCI值多在0.7以上,而S17因为小环藻属多,整体多样性较低,平均SCI值不到0.5.在这3个月的变化上,最明显的SCI值

变动出现在S16(五彩池),最高和最低值相差0.454.五彩池在10月份丰水期时硅藻种类丰富,SCI值较高,表明水体中较高的硅藻多样性,11月水位下降,水中出现大量的细齿菱形藻造成多样性降低,直到12月份多样性一直维持在较低水平.另外,样点S1、S3、S5、S11、S15的SCI值也有比较明显的变动,这与水体的微环境特别是S1和S15较不稳定的流水环境有关.

从相关分析结果可以看出,九寨沟湖泊硅藻的多样性与海拔显著负相关.一方面,海拔升高水温降低,能生存的种类有减少的趋势,另一方面,海拔高的地方,游人的停留时间较短、人类活动相对较少,对环境的干扰小.水环境较稳定的情况下,群落中各物种间竞争较平衡,多样性也保持在较稳定的水平.而在低海拔地方,人类活动的干扰较强,会增加环境的不稳定性,导致物种间常常处于不均衡的竞争状态,有更多的物种能够得到生存的机会,多样性也就较大.当然,不同湖泊之间理化性质的差异会造成不同湖泊具体物种组成的差异,对多样性也有影响.

一般认为,在清水中群落的多样性指数高,而在污染水体中多样性指数则低^[20, 21],也有不同的观点,Archibald在比较不同的多样性指数后,认为多样性指数指示水质是值得怀疑的,有时甚至会导致错误的结论^[22].Rawson认为优势种的个体数量比种类数具有更大的意义^[23].国内也有学者在计算多样性指数时,得到在一些重污染的地点多样性指数较高以及和其他指标相关性很差的结果^[24, 25].我们对九寨沟各采样点的水质分析结果为:高锰酸盐指数(COD_{Mn})_{在0.86~1.61 mg/L之间,溶解氧含量(DO)在7.84~9.13 mg/L之间,总氮(TN)在0.43~0.59 mg/L之间,总磷(TP)在0.017~0.021 mg/L之间.国家I类地表水的水质标准是COD_{Mn}≤2 mg/L, DO≥7.5 mg/L, TN≤0.2 mg/L, TP≤0.02 mg/L,可以看出, COD_{Mn}、DO已经达到标准, TP接近I类水质标准, TN超过I类水质标准而在II、III类水质标准之间(0.5~1.0 mg/L).总体上说,九寨沟较符合国家I类地表水水质标准,各样点水质都较好.而多样性在不同采样点存在差异,海拔不同、密度不同的湖泊多样性也不同,与水质差异并无明显对应关系.}

多样性包括种类的丰富程度和均匀程度两个方面,九寨沟湖泊中硅藻密度大的水体,往往是由于某个物种占优势,降低了群落中种的均匀度,因而表现出多样性下降.我们认为,在九寨沟这样的清洁水体中,影响多样性的原因更多的在于种间竞争,当各物种间竞争力量比较平衡的时候,多

样性高;当某个物种竞争力表现更强,在群落中占据优势的时候,就会使群落整体的多样性下降.而在污水环境中,首先是物种对于环境因子的耐受能力决定了它在这种环境能否生存,其次才是环境因子影响到物种在这种环境中的竞争能力.如果水体污染不太严重,能够生存的种就应该较多,相较于污染重、只有少数种能生存的水体来说,多样性当然会高;如果污染重但这些污染因素对于大多物种来说能够保证它们存活的时候,计算出物种的多样性仍然可能保持在较高水平.因此,清洁水中和污水中都可能出现多样性低和高的情况.在环境因素特别是水质理化性质影响到了物种的生存的时候,多样性能够反映水质状况;而在环境因素对物种的生存没有重要影响的时候,多样性更多地反映了物种间的竞争,而不是水质差异.因此,在使用多样性判断水质的时候,首先应该了解影响该水体生物多样性的因素,然后综合理化性质等其他指标再作分析和比较.

4 结语

在调查的九寨沟景区17处湖泊样点的硅藻中,真性浮游种类少、着生种类多,以羽纹纲种类为主,种类数以脆杆藻属、舟形藻属、桥弯藻属和异极藻属为多.长海小环藻属占绝对优势,五彩池在秋末11月的时候出现大量细菌菱形藻,都与其各自水环境的特点相关.首次发现了典型的富营养化指示种颗粒直链藻(*M. granulata*)和星形冠盘藻(*S. astraea*)。在旅游旺季出现,并在淡季消失,表明旅游对九寨沟核心景区的湖泊产生了一定的影响,而其生态系统具有较强的自我调节功能.

在空间上,硅藻细胞密度受到环境因子的综合作用而表现出与海拔显著的正相关. Cairns连续比较指数的数据显示,硅藻群落的多样性普遍较高,与海拔显著正相关,与密度呈现极显著的负相关,都是由于种间竞争的结果.我们认为,在清洁水体中,多样性主要决定于种间竞争,并不能真实地反映水质状况,因此使用多样性来比较不同水体的营养程度时应该特别注意.

致谢 九寨沟风景区管理局科研处提供了实验室进行水样的初步处理,金辉处长和蔡永寿副处长协调各部门为本文研究的野外调查取样给予了协助,肖维阳、葛凤琼、江丽君等陪同采集水样,中国科学院成都生物所韦筱媚、徐波、李静静、方志强、王雨等参与了野外调查和水质分析实验,涂卫国博士对统计分析提供了宝贵意见.

References

- Bao SK (包少康), Tan MC (谭明初), Zhong ZX (钟肇新). A survey of the algal flora in the Jiuzhaigou Nature Reserve of Sichuan. *J Southwest Teachers Univ* (西南师范大学学报), 1986, **3**: 56~71
- Smol JP, Birks HJB, Last WM. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Vol 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. 155~190
- Kelly MG, Cazaubon A, Coring E, Dell'Uomo A, Ector L, Goldsmith B, Guasch H, Hürlimann J, Jarlman A, Kawecka B, Kwandrans J, Laugaste R, Lindström E, Leitao M, Marvan P, Padisák J, Pipp E, Prygiel J, Rott E, Sabater S, van Dam H, Vizinet J. Recommendations for the routine sampling of diatoms for water quality assessments in Europe. *J Appl Phycol*, 1998, **10**: 215~224
- Ding L (丁蕾), Zhi CY (支崇远). Environmental effects on diatom and its monitor of environment. *J Guizhou Norm Univ Nat Sci* (贵州师范大学学报自然科学版), 2006, **24** (3): 13~16
- Liu SY (刘少英), Zhang XP (章小平), Zeng ZY (曾宗永) eds. Biodiversity of the Jiuzhaigou National Nature Reserve. Chengdu, China (成都): Sichuan Publishing House of Science and Technology (四川科学技术出版社), 2007
- Shen YF (沈韞芬), Zhang ZS (章宗涉), Gong XJ (龚循矩), Gu MR (顾曼如), Shi ZX (施之新), Wei YX (魏印心). Modern Biomonitoring Techniques Using Freshwater Microbiota. Beijing, China (北京): China Architecture & Building Press (中国建筑工业出版社), 1990. 136~137
- The Editorial Committee of Water and Exhausted Water Monitoring Analysis Method (《水和废水监测分析方法》编委会). Water and Exhausted Water Monitoring Analysis Method. 4th ed. Beijing, China (北京): China Environmental Science Press (中国环境科学出版社), 2003
- Qi YZ (齐雨藻). Flora Algarum Sinicarum Aquae Dulcis tomus IV: Bacillariophyta Centrica. Beijing, China (北京): Science Press (科学出版社), 1995
- Hu HJ (胡鸿钧), Li RY (李尧英), Wei YX (魏印心), Zhu HZ (朱惠忠), Chen JY (陈嘉佑), Shi ZX (施之新). Freshwater Algae in China (中国淡水藻类). Shanghai, China (上海): Shanghai Science and Technology Press (上海科学技术出版社), 1980. 130~199
- Krammer K, Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae (1-4 Teil). In: Ettl H, Gerloff J, Heynig H, Mollenhauer D eds. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart/Jena, Germany: Gustav Fischer Verlag, 1986~1991
- Kuang QJ (况琪军), Hu ZY (胡征宇), Zhou GJ (周广杰), Ye L (叶麟), Cai QH (蔡庆华). Investigation on phytoplankton in Xiangxi River watershed and the evaluation of its water quality. *J Wuhan Bot Res* (武汉植物学研究), 2004, **22** (6): 507~513
- Zhu HZ (朱惠忠), Chen JY (陈嘉佑). Bacillariophyta of the Xizang Plateau. Beijing, China (北京): Sciences Press (科学出版社), 2000
- Li JY (李家英), Zheng JP (郑锦平), Wei LJ (魏乐军). The study on the diatoms of the palaeolake sediments and its palaeoenvironments in Dahyab Tso (Taicuo) Lake, Xizang (Tibet). *Acta Geol Sin* (地质学报), 2005, **79** (3): 295~302
- Zhang RC (张茹春), Niu YL (牛玉璐), Zhao JC (赵建成), Chang BQ (常宝权), Yu SP (于淑萍), Hu YJ (胡亚军). Algae composition and temporal and spatial distributions in Huaihahe River-Huaijiuhe River Nature Reserve. *Acta Bot Bor -Occid Sin* (西北植物学报), 2006, **26** (8): 1663~1670
- You QM (尤庆敏), Li HL (李海玲), Wang QX (王全喜). Preliminary studies on diatoms from Kanasi in Xinjiang Uighur Autonomous. *J Wuhan Bot Res* (武汉植物学研究), 2005, **23** (3): 247~256
- Xin XY (辛晓云). Assessment of water pollution using population structure of floating diatom in Nanwan reservoir in Henan. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 2003, **22** (5): 125~126

- 17 Luan Z (栾卓), Fan YW (范亚文). Preliminary studies on diatoms from Songhua River of Harbin. *Nat Sci Harbin Norm Univ* (哈尔滨师范大学学报自然科学版), 2007, **23** (1): 83~85
- 18 Zhang NQ (张乃群), Wang ZD (王正德), Du MH (杜敏华), Pang ZL (庞振凌), Li YY (李玉英), Hu LQ (胡兰群). Phytoplankton and water quality of water source area of the middle line project of south to north water diversion. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2006, **12** (4): 506~510
- 19 Zhou X (周谐), Zheng J (郑坚), Huang SM (黄书铭), Wang MS (王明书). Investigation and Evaluation of Pelagic Algae and Water Quality about the Three Gorges Reservoir of Chongqing. *Environ Monitoring China* (中国环境监测), 2006, **22** (4): 70~73
- 20 Odum EP. The Foundation of Ecology. Translated by Sun RY (孙儒泳). Beijing, China (北京): People Education Press (人民教育出版社), 1981
- 21 Reynolds CS. The Ecology of Freshwater Phytoplankton. London, UK: Cambridge University Press, 1984
- 22 Archibald REM. Diversity in some South African diatom associations and its relation to water quality. *Wat Res*, 1972, **6**: 1229~1238
- 23 Rawson DW. Algae indicators of trophic lake types. *Limnol Oceanogr*, 1956, **1**: 18~25
- 24 Meng RX (蒙仁宪), Liu ZQ (刘贞秋). The evaluation of water pollution and eutrophication in Chaohu with phytoplankton. *Acta Hydrobiol Sin* (水生生物学报), 1988, **12** (1): 14~26
- 25 Zhang ZS (章宗涉), Mo ZC (莫珠成), Rong KR (戎克文). The detection and evaluation of waterpollution in Tumen river with algae. *Acta Hydrobiol Sin* (水生生物学集刊), 1983, **8** (1): 97~104