

东北松嫩平原区湖泊对气候变化响应的初步研究^{*}

桂智凡^{1,2}, 薛 滨^{1**}, 姚书春¹, 魏文佳^{1,2}

(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2:中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 以气候变暖为主要特点的气候变化已成为当前研究的焦点, 气候变化和不同类型的生态系统之间的相互作用更是受到广泛关注。东北地区作为我国气候变化的一个敏感区, 观测记录和多种模式预估显示该区气候变暖显著并将进一步增强, 降水变化趋势则不明显或略有增加。东北松嫩平原湖泊群是我国湖泊密度最大的湖区之一, 但近几十年来, 该区湖泊生态环境不断恶化, 其中气候因素最为受人关注。本文从以下几个角度综述了松嫩平原湖泊群对气候变化的响应: (1) 湖泊面积和湖泊水位; (2) 湖泊水质; (3) 湖泊生态多样性。在此基础上, 探讨了该区未来气候变化对湖泊可能影响以及湖泊的演变趋势, 也阐述了在这种自然背景下的人类活动对湖泊环境演变的影响。

关键词: 松嫩平原; 湖泊; 气候变化; 人类活动

Responses of lakes in the Songnen Plain to climate change

GUI Zhifan^{1,2}, XUE Bin¹, YAO Shuchun¹ & WEI Wenjia^{1,2}

(1:State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2:Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

Abstract: Climate warming as the main feature of climate change has become current research focus, and the interaction between climate change and different types of ecosystems is widely concerned. Northeast China is one of the most sensitive areas of climate change where the observation records and a variety of forecasting models show that it has experienced a significant climate warming period and the trend will be further enhanced. However, precipitations have not obvious trends or show slightly increase. Lake group in Songnen Plain is one of the highest density lake district in China. However, in the recent decades, its ecological environment has been continuously deteriorated due to several factors that climate change is the obvious one. In this paper, responses of Songnen Plain lakes to climate change are summarized from the following three characteristics: (1) lake area and lake water level; (2) lake water quality; and (3) lake ecological diversity. On the basis of above study, impact of future climate change on Songnen Plain lakes and the lakes' evolution trend are estimated, human activities' impact on the environmental evolution of the lakes is also discussed.

Keywords: Songnen Plain; lakes; climate change; human activities

IPCC 第四次报告表明近百年来气候快速变暖已是不容争议的事实^[1], 以气候变暖为主要特征的气候变化导致许多生态系统发生了较大的变化^[2-4]。其中气候变化和湖泊生态系统之间的相互作用是当前全球变化研究的一个热点, 但是关于湖泊与长期气候变化之间关系的研究, 当前国内外更多的是基于利用湖泊沉积物的多项指标来反演湖泊的环境演变, 以及古气候如温度、降水量的变化^[5-10], 而现代气候变化对湖泊生态系统的影响研究相对较少^[11-12]。近五十年来东北区域是我国东部气候变化较为显著的地区, 也是增温最为明显的区域之一。该区湖泊众多, 其中松嫩平原湖泊群是我国湖泊密度最大的湖区之一, 近些年该区域湖泊环境变化非常显著, 突出的如湖泊的咸化、萎缩及水体营养水平的升高等。目前在该区已经开展了一些相关工作, 如

* 国家自然科学基金项目(40771197)和江苏省基金项目(BK2009331, BE2008690)联合资助。2010-02-03 收稿; 2010-06-18 收修改稿。桂智凡, 男, 1980 年生, 博士研究生; E-mail: xiaoguizi800104@126.com.

** 通讯作者; E-mail: bxue@niglas.ac.cn.

吕金福等研究了莫莫格湖泊群近几十年环境演变^[13],张艳红等研究了松嫩平原水环境问题^[14].但对东北区现代气候变化和湖泊生态系统之间相互关系的研究相对较少.本文选取东北区典型的湖泊群——松嫩平原湖群作为研究对象,简述了该湖群近几十年的环境变化,探讨了气候变化对其影响和未来的变化趋势.

1 研究区背景

松嫩平原地处温带半湿润、半干旱季风型大陆性气候区.冬季受西伯利亚大陆气团控制,低温干燥,夏季受副热带海洋气团控制,温和多雨;春、秋两季降水稀少,风力较大.湖区年平均温度为3~6℃,1月份平均温度为-19至-15℃,7月份平均温度为22~24℃,年降水量400~600mm,降水的年际变率大,年蒸发量多在1100~2000mm^[15-17].

松嫩平原湖泊主要分布于吉林省白城市、松原市和黑龙江省齐齐哈尔市南部地区、大庆市西南部地区.主要由松花江和嫩江冲积而成,境内较大支流有讷莫尔河、乌裕尔河、洮儿河、霍林河、绰尔河、雅鲁河和诺敏河.该区湖泊具有面积小、湖水浅、矿化度较高等特点^[18].湖泊大多为河流成因,也有构造成因的如大布苏湖,人工湖如月亮泡等,以及小规模的风成湖.湖区面积约42750km²,湖泊面积2570km²,湖泊率为6%,是我国湖泊密度最大的湖区之一^[19].松嫩平原湖泊从分布区域上可划分为几个次级湖泊群,分别为大庆湖泊亚群、莫莫格湖泊亚群、舍力湖泊亚群、乾安湖泊亚群、大安湖泊亚群、向乌湖泊亚群^[17](图1).

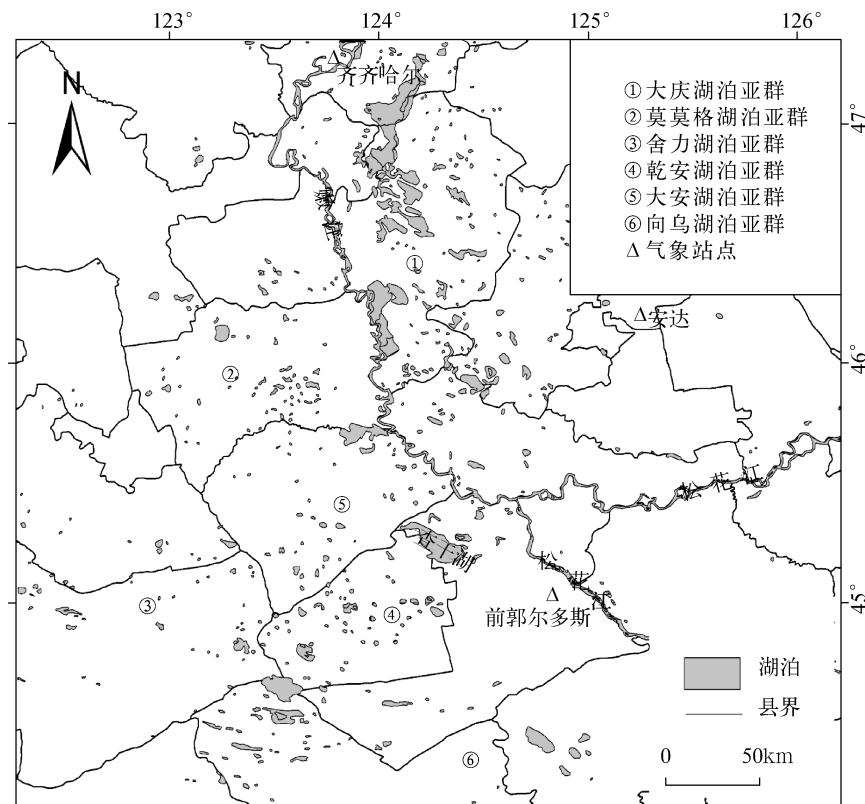


图1 松嫩平原典型湖泊群的地理位置
Fig. 1 The location of lake group in Songnen Plain

2 松嫩平原湖泊现状

2008年6月调查中发现松嫩平原湖群湖泊干涸萎缩现象严重.张家泡、莫莫格泡、苇子沟泡、小西米泡

完全干涸,四家泡已干并被垦为农田;喇嘛寺泡子由于不再引水面积也大幅度萎缩,鹅头泡大部分湖盆出露且水深仅为30cm左右,牛心套泡仅剩约1km²;北二十里泡成为蓄洪区,王花泡大部分已干,局部成为蓄洪区,乌拉盖泡变成水库;有些湖泊成为季节性湖,如波罗泡在雨季时呈湖泊,其他季节呈干涸状态。此外有研究显示莫莫格湿地水源补给河流洮儿河和二龙涛河自1998年以后已呈断流状态^[20]。

该区湖泊水质情况调查结果显示:松嫩平原湖泊透明度除茨勒泡、南山湖、牛心套泡和八里泡较高外;其他湖泊之间透明度差异较小,透明度均较差,低于0.5m。各湖泡水pH值差异较小,均大于7,呈碱性,大部分湖泡与《中国湖泊志》记录相比显著增加(图2)。另有研究表明湖泡水质Na⁺、HCO₃⁻、Cl⁻含量较高,呈苏

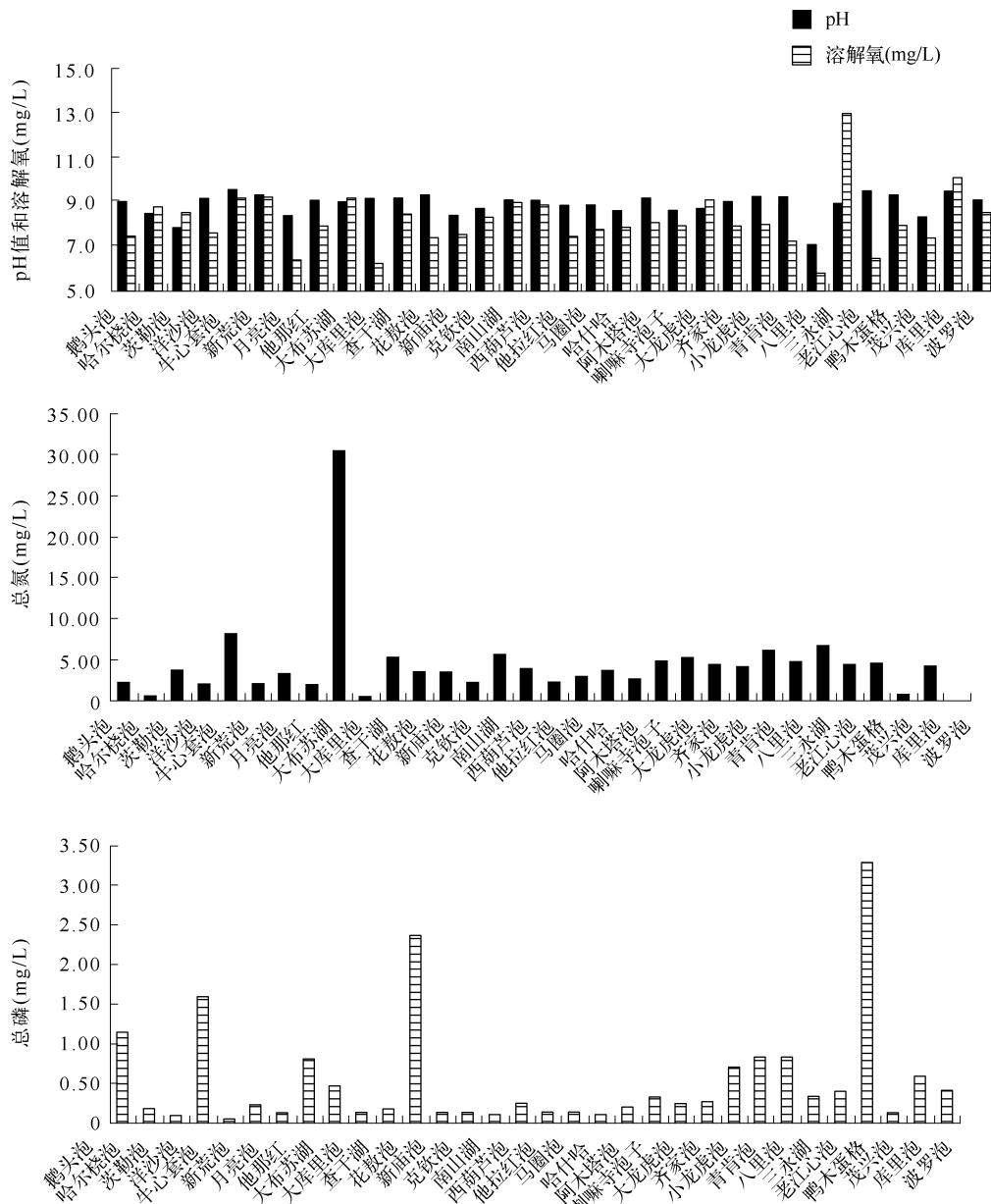


图2 2008年松嫩平原部分湖泊水质特征
Fig. 2 Water quality of some lakes in Songnen Plain in 2008

打钠型水特点,咸化现象明显并且比较严重^[14].本次调查结果也显示 Na^+ 含量显著增加.绝大部分湖泊点位溶解氧含量在 5–13mg/L 之间.松嫩湖泊群的总氮、总磷、叶绿素含量则较高,如总氮(TN)含量整体偏高,只有波罗泡和靠山湖某些点位总氮含量低于 0.25mg/L,绝大多数湖泊的总氮处于富营养水平以上;总磷(TP)含量最低为 0.05mg/L,大部分达到了富营养水平以上.另外也有相关资料表明该区湖泊的氟浓度严重超标(地表水氟的标准浓度为 0.5–1.0mg/L),本区湖泊大部分湖泊氟浓度大于 1.0mg/L,湖泊及地下水氟问题严重^[14,21].

3 东北松嫩平原湖泊对气候变化的响应

3.1 东北区域气候变化

IPCC 第四次评估报告显示全球气候变暖已是不容争议的事实,并且许多生态系统受到气候变暖的影响;同时全球气候变暖对降水的时空分布、极端事件频率和极值、水循环和水资源都有影响^[1].2007 年《气候变化国家评估报告》指出在过去的 100 年内中国大陆地区地表年平均气温增加约 0.5–0.8°C,20 世纪中国气候变化趋势与全球变暖的总趋势基本一致^[22].运用不同气候模式对中国未来的气候变化进行研究,结果显示 21 世纪前期将显著增温并且北方较南方显著^[23–25].

我国东北地区是一个气候变化的敏感区.黑龙江省的观测记录表明近五十年(1958–2007 年)暖化现象明显,年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温均呈现增高趋势;而年降水量表现出略减少的趋势^[26].气象统计资料(中国气象科学数据共享服务网)显示,安达、前郭尔多斯和齐齐哈尔三站(三站点位置见图 1)近五十年来年平均温度增温幅度较大,其年平均温度的五年滑动平均曲线显示增温达 2–3°C,尤其是三站点的变化趋势非常一致;而降水则呈略有减少的趋势并且变率较大(图 3),这表明该区过去五十年极端降水事件频发.实测记录和许多研究结果比较一致^[27–28],表明过去五十年来松嫩平原地区暖干化趋势明显.同样,基于实测数据的各种预估如:曾小凡等研究表明松花江流域 21 世纪前 50a 气温仍将增加,年降水量变化趋势则不显著^[29].赵宗慈等利用模型预估 21 世纪中国东北地区气候变化,表明 21 世纪气温将明显变暖并且在后期气温将增加 3.0°C 以上,其中北部变暖更多,降水将可能增加,尤以夏季明显;另一方面,中国东北地区径流量将可能略增加,蒸发将可能增加,土壤湿度将可能减少^[30].这些研究均预估东北地区气候变暖显著,且冬季增幅最大;但是年降水量无明显变化趋势,只是降水的季节变化明显.

3.2 松嫩平原湖泊对气候变化的响应

3.2.1 湖泊面积和湖泊水位 湖泊水量取决于湖面蒸发、入湖径流、湖面降水和湖泊用水等因素.这些因素都与气候变化有着密切关系.国内外研究发现湖泊的消长变化与气候变化有很好的相关性^[31–34].许多研究也表明气候变化对湖泊水位有重要影响^[35–37].前面关于气候变化的相关研究结果已经表明该区过去五十年内暖干化趋势明显且影响强烈;并且在当前趋势下,东北区的气候在 21 世纪相当长时间内将呈现持续变暖现象.在温度升高且增幅较大,而降水量略增加甚至减少的前景下,该区的蒸发必将增强,同时气候的变暖导致人类用水需求增大,这将进一步导致湖泊湿地的补给水量减少从而使湖泊水域面积和水位降低.吕金福等研究表明莫莫格湖群湖区年均温度呈明显的上升趋势,增温幅度达 2–4°C,降水则波动明显,干燥度指数表明莫莫格湖群近五十年除 20 世纪 80 年代外暖干化趋势明显^[13].这与东北区的气候变化趋于一致,这种变化趋势也和实际调查中莫莫格湿地现存状况比较吻合.实地调查结果显示莫莫格泡已干涸,莫莫格湿地大幅退缩.松嫩平原湖泊湖水补给主要靠降水和区内入湖径流.吕金福等通过近五十年的气象资料和主要补给河流的水文记录研究莫莫格湖泊群湖泊水位变化,表明较长时间尺度如年代际的湖泊水量主要受降水等因素影响,小于年代际尺度内则主要受人类活动的影响^[13].林年丰等利用 TM 卫星影像解译了松嫩平原区水体和盐碱地的变化情况,结果显示在 1989–2001 年的 12 年内水体面积显著减少,全区年减少率为 3.81%^[38].李晶晶等利用 RS 提取了大安湖群近几十年的湖泊面积情况,发现其面积和数量变化对该区持续的暖干化气候具有较好的响应,该湖泊群湖泊的萎缩和数量的减少是气候持续暖干化驱动的结果^[39].此外,这种气候驱动湖泊群湖泊面积减少和水位持续下降的现象在东北区的湿地上表现尤为显著.张树清等研究发现三江平原湿地面积消减与该区气候暖干化趋势高度相关并得出其与温度正相关,与降水湿度负相关,而与日照和降雪相关很低或无相关性^[40].刘吉平等研究发现黑龙江省湿地空间分布与纬度(温度)经度

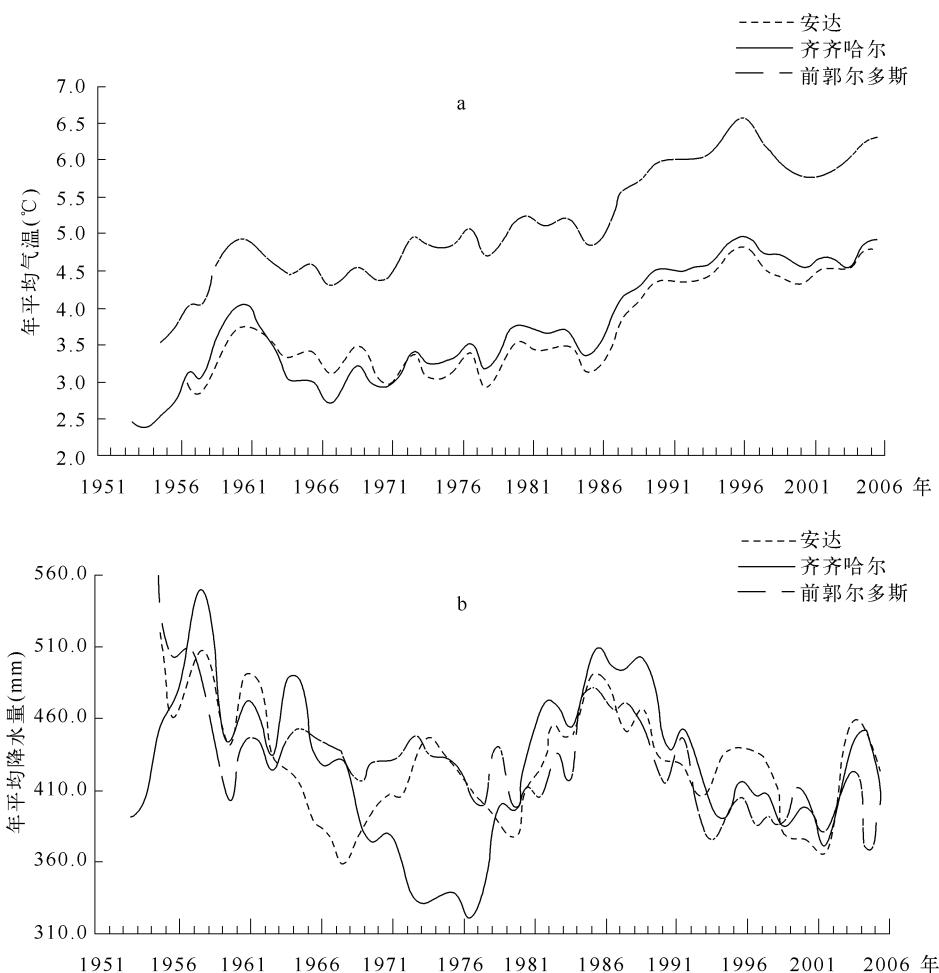


图3 过去几十年安达、齐齐哈尔和前郭尔多斯年均气温(a)和降水量(b)的五年滑动平均曲线

Fig. 3 The 5-year running mean curve of temperature(a) and rainfall(b) in Anda, Qiqihar and Qianguoerduosi station over the past few decades

(湿度)有关,而 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温不利于湿地形成与发育^[41]。因此在未来该区气候持续变暖,特别是积温升高,而降水几乎不变的情境下,湖泊由于补给不足和蒸发变化,东北区的湿地特别是湖泊湿地和沼泽湿地的水量和面积可能呈现继续减少的趋势。

东北区的气候变化还呈现出极端降水事件(旱涝灾害)的频率和强度明显加强的趋势。干旱化趋势的加强必将导致入湖的补给减少,从而使水位下降和水域面积减少。近几十年来东北区洪涝、洪水、干旱频发^[42-44]。如1999–2001年3年的连续干旱,加上人类需水量增加,三江平原许多湿地地表已经完全干涸,地下水水位从3–5m下降到了目前的12m左右,大片的芦苇、苔草湿地退化为碱蓬地甚至盐碱光板地^[45]。因此,灾害天气会影响湖泊的水量变化和湖泊面积状况,并且影响还会进一步增强。

3.2.2 湖泊水质 湖泊水质受降水量、蒸发量及温度等气候因素影响,许多资料和国内外研究已经证实湖泊的水化学性质与气候变化有密切的关系^[46-47]。张艳红等研究表明松嫩平原湖泡中氟浓度严重超标与湖水温度升高导致氟离子富集有关;同时研究还显示该区湖泊盐度、硬度的增高和该区蒸发强降水少的气候特点有关,湖泊趋于盐沼化^[14]。王文军等研究发现松嫩平原西部地区水环境中氟的浓度分布特点是湖泡水>河水,地下潜水>承压水,并证实其与气候因素温度和降水有一定关系^[21]。此次湖泊调查发现松嫩平原区湖泊透明度普遍较低,一般在0.50m以内,仅水草较多的茨勒泡、牛心套泡、南山湖透明度较高,但这是由于受水

草分布的影响；八里泡是个例外（透明度高，污染重，无水草）。该区湖泡水的 pH 值较高，一般在 8.5 以上，与河流无水力联系的可高达 9.8，唯一低于 7.0 的是靠山湖的一个点位。调查中还发现：外流区咸化程度低，闭流区咸化程度高；与河流有水力联系的咸化程度轻于与河流无水力联系的湖泡，后者的矿化度、离子浓度（主要是钠离子还有氟离子）、碱度也比较大。调查中还对盐度和湖泡水的 pH 值进行对比分析，发现两者具有很好的对应关系，即湖泡水盐度较高时对应 pH 值也较大。另外对以往研究和本次调查的数据进行分析和探讨（表 1），显示该区几个典型湖泊 pH 值明显升高，而 Na^+ 、 HCO_3^- 含量则增加，并且增加的幅度较大，这表明湖泊有咸化的趋势，这和前人的研究比较一致^[14]。该区持续的暖干化气候导致湖区大气降水减少和蒸发增强；同时导致大量农田回水的注入，而这些回水大多是抽取的富含 Na^+ 、 HCO_3^- 地下水，从而使得湖水呈现这种盐碱化趋势。已有研究表明松花江河水中 Na^+ 、 HCO_3^- 含量和使用地下水灌溉的农田面积显著相关^[48]。可以预见该区在气候继续变暖而降水不变（或略增加）的背景下，该区湖泊入湖径流量减少，而湖区蒸发增强再加上农业用水的影响，湖泊的矿化度、碱度及盐度将可能持续升高，但具体情况要结合气候模式和蒸散模型进行进一步的综合研究。

湖泊富营养化已经成为我国湖泊所面临的最重要的环境问题。本次湖泊调查发现松嫩平原大部分湖泊的总氮和总磷水平已经达到富营养化水平，化学耗氧量较高。但该区湖泊 TN 浓度大幅度升高，而 TP 的浓度明显下降（表 1），这可能与稻田退水有关。松嫩平原西部稻田回归水中污染物研究表明输出的总氮要远高于总磷^[54]。TP 尽管降低，但叶绿素 a 浓度却增加，这可能是由于藻类的增加而导致。《中国湖泊志》记载新庙泡、茂兴湖浮游藻类生物量分别为 8.59mg/L、8.54mg/L，本次调查新庙泡四个样点浮游藻类生物量在 12.21–38.91mg/L；茂兴湖两个样点浮游藻类生物量为 219.18mg/L 和 226.75mg/L；连环湖-西葫芦泡三个样点的浮游藻类生物量 458.51–883.15mg/L，其中微囊藻含量占 61.6%–85.1%；连环湖-阿木塔泡两个样点生物量为 135.82mg/L 和 136.40mg/L，其中水华微囊藻为优势种占总生物量的 69%–77%。这些湖泡的浮游藻类生物种类、数量都有所上升，特别部分湖泊中微囊藻是优势种。这些数据表明该区大部分湖泊水质变差，水体营养水平在向富营养化方向转变。实际调查中发现近几年在本区湖泊如西葫芦泡、大龙虎泡等湖泊每年从春天开始出现水藻（绿色），数量逐年增多，滞留时间也逐年延长，这和本次调查所显示的湖泊营养状态结果比较吻合。藻类生长增加也可能是湖泊温度升高导致的。任健等研究表明太湖蓝藻最适宜的生长发育温度范围为 28–33℃，偏高的温度有利于其生长发育和暴发^[55]。陈宇炜等研究表明微囊藻水华的适宜水温范围是 20℃以上^[56]。Murdoch 等研究也表明在当前气候变化下温暖而营养丰富的水体将更有益于藻类生长并且水体更容易富营养化^[57]。松嫩平原区长期的暖干化气候可能为浮游藻类提供了适宜的温度条件，并且这个温度范围和时间段可能还在向有利于藻类生长发育的方向变化，从而使得藻类生物量增加，特别是微囊藻。另外气候暖干化趋势导致湖泊水位变浅、水温增加及变温层位置的改变，从而改变湖底的环境状况，可能会使湖底沉积物的营养盐得以释放，从而导致湖泊富营养化程度加剧。因此，当前气候变化对东北区域湖泊富营养化有何影响值得关注。

表 1 不同研究结果中松嫩平原 4 个湖泊水质的比较^{*}

Tab. 1 Comparison of water quality from various studies in 4 lakes in Songnen Plain

参数	他拉红泡			月亮泡		查干湖		新庙泡	
透明度(m)	0.29 ¹	0.28 ²	0.14	0.40 ³	0.28	0.26 ⁵	0.17	0.46 ⁷	0.41
pH	8.43 ¹	8.54 ²	8.82	8.20 ³	8.37	8.40 ⁴	9.08	7.80 ⁷	8.31
碱度 (mmol/L)	6.85 ¹	7.79 ²	9.38	—	—	—	—	—	—
Na^+ 含量 (mg/L)	115.66 ¹	49.40 ²	177.36	46.30 ⁴	51.99	297.30 ⁴	273.18	15.19 ³	44.42
HCO_3^- 含量 (mg/L)	346.29 ¹	356.38 ²	831.56	167.00 ⁴	203.87	501.03 ⁴	559.70	11.13 ³	236.26
叶绿素 a ($\mu\text{g}/\text{L}$)	—	—	3.91	—	15.12	37.57 ⁶	40.44	28.58 ⁷	37.94
TN (mg/L)	1.09 ¹	0.68 ²	2.37	0.04 ³	3.41	1.67 ⁵	5.17	2.94 ³	3.49
TP (mg/L)	0.42 ¹	0.46 ²	0.80	0.12 ³	0.12	0.49 ⁵	0.18	1.49 ³	0.13

* 1) 数据来源文献[49]，2) 数据来源文献[50]，3) 数据来源文献[18]，4) 数据来源于文献[51]，5) 数据来源于《吉林省重要渔业水域生态环境监测报告》(2006 年)，6) 数据来源文献[52]，7) 数据来源文献[53]，未标注的来自本研究。

3.2.3 湖泊生态多样性 东北区众多湖泡为各种水生植物的生长、水禽及各种鱼类的生存提供了良好的环境条件,也是我国鸟类东部迁徙路线中的重要停歇地和繁殖地,生物多样性极为丰富。以松嫩平原湖泊湿地为例,该区湖泊植物种类约148种,这些物种成分多样;同时该区湖泊成因、湖泊连通状态和水质特点多样使得生物群落类型也非常丰富^[16]。但东北地区近几十年持续的暖干化趋势及暖冬现象^[27,29]和极端灾害天气的频发^[42-44]一方面改变物种的分布界限,如原先分布范围较狭窄的动植物变为濒危物种;另一方面造成湖泊和湿地面积大幅度减少^[40-41],生物生存的栖息地减少,从而使得该区域物种多样性迅速减少。据研究表明在气候暖干化的驱动下松嫩平原扎龙湿地鸟类资源在种类和数量上都发生了明显的变化,种类由1984年的61种减少到1999年的42种,数量由13620只减少到1999年4555只;同时松嫩平原湿地的鱼类数量和种类也下降,湖泡植被群落趋于单一化^[58]。白璟贵等研究也表明莫莫格湿地由于暖干化的气候影响,该区域鸟类数量急剧下降,1999—2001年期间鸟窝数量由50多个减少到了3—4个,天鹅的数量也呈减少趋势^[59]。吕金福等研究表明在自然因素控制下莫莫格湖泊群的环境变化及植被群落的演替主要受大气降水的制约^[13]。同时东北区未来极端事件如干旱洪涝的频发将破坏物种的生存环境,从而影响生物的多样性。本次调查发现本区很多湖泊在20世纪70、80年代有过干枯,譬如连环湖的西葫芦泡、火烧黑泡及大龙虎泡等在干枯前芦苇及沉水植物分布密集,但大水过后,芦苇及沉水植物基本消失;而近两年,这些湖泊的芦苇又有复苏的迹象,这说明由年代际的降水变化^[13]而导致的生境损失是影响水生植物多样性的因素之一。继续关注松嫩平原湖泊群生物多样性的变化及原因探讨,特别是气候因素,将有助于更深刻地了解该区的环境演变、物种的保护及水资源的开发利用。

3.3 松嫩平原湖泊与东北区其他湖泊的比较

东北区其他区域湖泊如兴凯湖、镜泊湖、五大连池(表2)水质状况变化显示:湖泊水质也有所降低,但无论是营养盐的变化,还是一些常规的指标如透明度、pH值或COD_{Mn}等的变化都较小,变化幅度较松嫩平原湖泊也小;水体中常规离子的含量变化也较小^[60-61];甚至有些指标如TN的变化和松嫩平原湖泊呈相反的变化即减少趋势。研究表明该区湖泊水质的下降主要是人类活动如旅游业的发展导致的,如张新刚等研究表明镜泊湖TN和TP峰值月份均出现在旅游旺季^[63]。另外也未见报道有关这些湖泊萎缩和水位下降的研究,这可能与其地理位置和气候有关。气象统计资料(中国气象科学数据共享服务网)显示牡丹江和鸡西两站的年均气温增幅较松嫩平原小,其五年滑动平均增幅为1—3℃,也较松嫩平原小;而降水则基本保持不变,除了20世纪70年代外也没有明显的极端事件的发生,因而该区的气候变化较为平缓还不足以导致该区湖泊环境发生较大的变化。刘正茂等的研究也表明现阶段兴凯湖能够满足近期和远期水量需求^[65]。因此,与松嫩平原湖泊不同,这些湖泊的变化与人类活动有关。

表2 东北区不同区域典型湖泊水质的比较*

Tab. 2 Comparison of water quality of some lakes in other regions of the Northeast China

参数	兴凯湖			镜泊湖		五大连池	
透明度(m)	0.19 ¹	0.20 ³	0.18	2.0 ²	1.1 ⁵	0.68 ²	0.86
pH	7.6 ¹	7.5 ³	8.61	7.4 ²	7.3 ⁵	7.8 ²	8.04
COD _{Mn} (mg/L)	7.3 ¹	5.3	8.47	6.71 ²	6.85 ⁵	7.94 ²	9.33
TN(mg/L)	1.53 ²	0.97	2.43	0.94 ²	0.72 ⁵	1.78 ²	1.52
TP(mg/L)	0.207 ²	—	0.16	0.46 ²	0.06 ⁵	0.21—0.67 ²	0.10
HCO ₃ ⁻ 含量(mg/L)	78.6 ¹	77.98 ³	—	—	—	—	—
Ca ²⁺ 含量(mg/L)	27.9 ¹	22.3 ³	—	0.709 ²	—	—	—
浮游植物生物量(mg/L)	3.11 ²	0.85 ⁴	—	—	27.57 ⁶	4.63 ²	—

* 1)数据来源文献[66],2)数据来源文献[18],3)数据来源文献[67],4)数据来源文献[62],5)数据来源文献[63]2003—2006四年平均,6)数据来源文献[64],未标注的来自本研究。

4 结论与展望

当前松嫩平原区域湖泊所发生的这些变化不仅是气候变化带来的结果,而且也与人类的活动密切相关。

关。人类活动如大规模的开垦、农业活动的增强、工业活动和生活污水的排放、大型水利工程的建设等进一步加剧了松嫩平原湖泊这种变化趋势，从而造成今天湖泊面临日益严峻的形势。如据《中国湖泊志》记载，查干湖湖水的pH值，引松（花江）后为9.2，引松前为10.0；碱度在引松前后分别为19.25me/L和23.72me/L，可见引松后查干湖湖水明显淡化^[18]。同样，据统计松嫩水系已建有中型水库67座，小型水库413座，堤防长度达到6338km，并修建了许多引水灌区^[66]。这些水利工程的建设减少了入湖径流量同时也改变湖区水循环的模式，从而导致湖泡缺水、水质恶化和生态功能退化。因此，松嫩平原湖泊的这些变化是气候变化和人类活动共同的结果，气候变化是该区湖泊环境变化的内在动因，而人类活动则加速了这些变化，即人类活动叠加在气候变化之上，对湖泊湿地的变化产生放大作用。这些变化表现在：该区湖泊数量的减少和面积的萎缩，并且导致当地生态环境发生巨大的变化，如生物多样性的降低，缺少湖泊的滞水消峰作用，当地将面临巨大的洪涝威胁；湖泊水质下降，富营养化和盐碱化加剧，这将进一步加剧用水需求的困难；湖泊生物多样性的降低，这将导致湖泊生态系统功能退化、区域环境和气候的进一步恶化，从而影响人类的生存和发展。

总之，在人类活动和气候变化的共同作用下，松嫩平原区域湖泊环境发生了显著的变化并且这些变化很可能在短时间内不会改变，而且这些变化使松嫩平原区域湖泊面临巨大的危机，这种危机可能导致社会、经济的巨大风险。因此，继续深入开展该区湖泊在气候变化和人类活动胁迫下变化趋势研究，特别是湖泊富营养化和藻类变化、湖泊碳源碳汇问题以及湖泊生态系统阈值研究，有助于我们应对区域日益严重的水资源危机和水安全风险。

致谢：中国科学院南京地理与湖泊研究所的王涛和姜永见博士为本论文提出了建议。同时也感谢审稿人和编辑给予的宝贵建议。

5 参考文献

- [1] IPCC. IPCC Fourth Assessment Report (AR4). Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] UNDP. Beyond scarcity: power, poverty and the global water crisis. Human Development Report, 2006.
- [3] IPCC. Climate change 2007: synthesis report. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/index.htm>.
- [4] Mcbean E, Mottee H. Assessment of impact of climate change on water resources: along term analysis of the Great Lakes of North America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008, **12**: 239-255.
- [5] Cohen AS. Paleolimnology: the history and evolution of lake systems. New York: Oxford University Press, 2003.
- [6] 王苏民. 湖泊沉积的信息原理与研究趋势. 见：张兰生编. 中国生存环境历史演变规律研究. 北京：海洋出版社，1993:22-31.
- [7] 郑绵平, 刘俊英, 齐文. 从盐湖沉积探讨40ka BP以来青藏高原古气候演替. 见：郑绵平编. 盐湖资源、环境与全球变化. 北京：地质出版社，1996:6-20.
- [8] 沈吉, 肖海丰, 王苏民等. 云南鹤庆深钻揭示的区域气候轨道尺度演化. 科学通报, 2007, **52**(10): 1168-1173.
- [9] 朱立平, 鞠建庭, 王君波等. 湖芯沉积物揭示的末次冰消开始时期普莫雍错湖区环境变化. 第四纪研究, 2006, **26**(5): 772-780.
- [10] 沈吉, 吕厚远, 王苏民等. 错鄂孔深钻揭示的青藏高原中部2.8Ma以来环境演化及其对构造事件响应. 中国科学(D辑), 2004, **34**(4): 359-366.
- [11] Mooij WM, Hülsmann S, Senerpront Domis LN De et al. The impact of climate change on lakes in the Netherlands: a review. *Aquatic Ecology*, 2005, **39**: 381-400.
- [12] 张运林, 秦伯强, 陈伟民. 增强的UV-B对湖泊生态系统的影响研究. 地球科学进展, 2005, **20**(1): 106-112.
- [13] 吕金福, 肖荣寰, 介冬梅等. 莫莫格湖泊群近50年来的环境变化. 地理科学, 2000, **20**(3): 279-283.
- [14] 张艳红, 邓伟, 翟金良. 松嫩平原西部湖泡水环境问题、成因与对策. 干旱区资源与环境, 2001, **15**(1): 31-36.
- [15] 罗新正, 朱坦, 孙广友等. 松嫩平原湿地荒漠化现状、成因和对策. 中国沙漠, 2003, **23**(4): 372-378.
- [16] 何春光, 郎惠卿, 卜兆君等. 松嫩平原湖泊湿地植物群落多样性及其保护研究. 国土与自然资源研究, 2006, **3**: 53-54.
- [17] 吕金福, 肖荣寰, 李志民等. 松嫩平原湖泊类型组合的区域分异. 东北师大学报(自然科学版), 2000, **32**(2): 99-105.
- [18] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京：科学出版社, 1998:7.

- [19] 吕金福,肖荣寰,李志民等.松嫩平原湖泊综合分类研究.东北师大学报(自然科学版),2000,32(2):92-98.
- [20] 王宝,姜维军.莫莫格湿地面临的困境及其解决途径探讨.吉林林业科技,2004,33(6):29-31.
- [21] 王文军,张学林.松嫩平原西部地区水环境中氟的研究.环境科学学报,1999,19(6):662-666.
- [22] 《气候变化国家评估报告》编委会.气候变化国家评估报告.北京:科学出版社,2007.
- [23] 姜大膀,王会军,郎咸梅.SRES A2 情景下中国气候未来变化的多模式集合预测结果.地球物理学报,2004,47(5):776-784.
- [24] 许吟隆,薛峰,林一骅.不同温室气体排放情景下中国 21 世纪地面气温和降水变化的模拟分析.气候与环境研究,2003,8(2):209-217.
- [25] 江志红,张霞,王冀. IPCC-AR4 模式对中国 21 世纪气候变化的情景预估.地理研究,2008,27(4):787-799.
- [26] 黑龙江省气候中心.黑龙江气候变化公报.2008.
- [27] 杨素英,孙凤华,马建中.增暖背景下中国东北地区极端降水事件的演变特征.地理科学,2008,28(2):224-228.
- [28] 孙凤华,杨素英,陈鹏狮.东北地区近 44 年的气候暖干化趋势分析及可能影响.生态学杂志,2005,24(7):751-755.
- [29] 曾小凡,李巧萍,苏布达等.松花江流域气候变化及 ECHAM5 模式预估.气候变化研究进展,2009,5(4):215-219.
- [30] 赵宗慈,罗勇.21 世纪中国东北地区气候变化预估.气象与环境学报,2007,23(3):1-4.
- [31] Poianik KA, Johnson WC, Swanson GA et al. Climate change and northern prairie wetlands: Simulations of long-term dynamics. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(5):871-881.
- [32] Schmidt R, Wunsam S, Brosch U et al. Late and post-glacial history of meromictic Längsee (Austria), in respect to climate change and anthropogenic impact. *Aquat Science*, 1998, 60(1):56-88.
- [33] 季中淳.中国历史时期干旱区湿地及其人地系统动力学的初步研究.干旱区地理,1996,19(4):1-9.
- [34] 陈桂琛,彭敏,李来兴.青海湖湿地环境特征及其保护与合理利用.中国湿地研究.长春:吉林科学技术出版社,1995:241-246.
- [35] William AG. Water levels of the great lakes of North America. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2005, 27(4):8-13.
- [36] 曹建廷,王苏民,沈吉等.近 40 年来内蒙古岱海水位下降的主要原因.干旱区研究,2009,19(1):1-6.
- [37] 秦伯强.近百年来亚洲内陆湖泊演变及其原因分析.湖泊科学,1999,11(1):11-19.
- [38] 林年丰,汤洁.松嫩平原环境演变与土地盐碱化、荒漠化的成因分析.第四纪研究,2005,25(4):474-483.
- [39] 李晶晶,贾建华,郝景研.基于 RS 的松嫩平原大安湖泊群面积提取与动态变化分析.遥感应用,2009,(3):44-53.
- [40] 张树清,张柏,汪爱华.三江平原湿地消长与区域气候变化关系研究.地球科学进展,2001,16(6):836-841.
- [41] 刘吉平,李宝林,张国坤.黑龙江省湿地空间分布规律及其影响因素的定量分析.东北林业大学学报,2005,33(5):65-67.
- [42] 潘华盛,张桂华,徐南平.20 世纪 80 年代以来黑龙江气候变暖的初步分析.气候与环境研究,2003,8(3):348-355.
- [43] 任宪平,刘丙友,王雅娟.浅议黑土区土壤侵蚀与自然灾害的关系.水土保持科技情报,2001,2:41-42.
- [44] 李宝林.松嫩沙地沙漠化气候因素的分析及沙地未来发展趋势.东北师大学报(自然科学版),1994,(2):94-99,109.
- [45] 潘响亮,邓伟,张道勇等.东北地区湿地的水文景观分类及其对气候变化的脆弱性.环境科学研究,2003,16(1):14-18.
- [46] Whitehead PG, Wilby RL, Battarbee RW et al. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques*, 2009, 54(1):101-123.
- [47] Evans CD, Monteith DT, Cooper DM. Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: observations, possible causes and environmental impacts. *Environmental Pollution*, 2005, 137:55-71.
- [48] 陈静生,夏星辉,张利田等.长江、黄河、松花江 60-80 年代水质变化趋势与社会经济发展的关系.环境科学学报,1999,19(5):500-505.
- [49] 薄玉华,王信海,姜秋俚等.连环湖卡拉白鱼放养场的浮游生物组成及水质分析.天津师范大学学报(自然科学版),2008,28(1):1-7.
- [50] 吴文化,薄玉华,耿红军等.连环湖他拉红泡浮游生物组成及水质分析.天津师范大学学报(自然科学版),2009,29(2):77-80.
- [51] 邓伟,何岩,宋新山等.松嫩平原西部盐沼湿地水环境化学特征.地理研究,2000,19(2):113-119.
- [52] 宋开山,张柏,王宗明等.吉林查干湖水体叶绿素 a 含量高光谱模型研究.湖泊科学,2007,19(3):275-282.

- [53] 徐京萍,张 柏,段洪涛等.新庙泡叶绿素a浓度高光谱定量模型研究.遥感技术与应用,2007,22(4):497-502.
- [54] 阎百兴,邓 伟,汤 洁.松嫩平原西部稻田回归水中污染物的输出规律.上海环境科学,2002,21(10):583-587,643.
- [55] 任 健,蒋名淑,商兆堂等.太湖蓝藻暴发的气象条件研究.气象科学,2008,28(2):221-226.
- [56] Chen YW, Qin BQ, Teubner K et al. Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: *Microcystis*-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China. *Journal of Plankton Research*, 2003, 25(1):445-453.
- [57] Murdoch PS, Baron JS, Miller TL. Potential effects of climate change on surface-water quality in North America. *Journal of the American Water Resources Association*, 2000, 36:347-366.
- [58] 佟守正,吕宪国.松嫩平原重要湿地恢复研究进展.地理科学,2007,27(1):127-128.
- [59] 白璟贵,刘改云,鲍显志.莫莫格湿地生态演变及水源解决途径探析.吉林水利,2002,(4):9-11.
- [60] 战培荣,赵吉伟,卢 玲等.兴凯湖渔业环境监测及水质评价.黑龙江水产,2003,(6):18,47.
- [61] 卢 玲,刘 永,赵彩霞等.黑龙江、绥芬河、兴凯湖渔业水域水质及评价.水产学杂志,2002,15(2):69-73.
- [62] 姜作发,董崇智,战培荣等.大兴凯湖浮游动物群落结构及生物多样性.大连水产学院学报,2003,18(4):292-295.
- [63] 张新刚,冷雪莲,于洪贤.镜泊湖水环境质量综合评价及保护对策探讨.水利渔业,2007,27(4):55-56,74.
- [64] 宋 辞,于洪贤.镜泊湖浮游植物多样性分析及水质评价.东北林业大学学报,2009,37(4):40-42.
- [65] 刘正茂,吕宪国,武海涛等.兴凯湖最低生态安全水位研究.水利水电技术,2008,39(2):8-10,25.
- [66] 姜 明,吕宪国,许林书等.松嫩平原湿地生态系统扰动因子及其反馈.资源科学,2005,27(6):125-131.