

水温升高对水体性质及水生生物的影响研究进展

王锦旗, 宋玉芝, 黄 进

(南京信息工程大学 应用气象学院生态学系, 南京 210044)

摘要: 全球变暖导致水温升高, 河流、湖泊普遍升温, 而这种增温趋势还将加剧。水温升高, 直接导致水体稳定度提高, 垂向对流减少, 分层现象加剧, 冰河解冻提前, 水体封冻期缩短; 间接导致水体溶解氧含量降低, 尤其底层水体缺氧现象更加严重, 底层水体缺氧导致沉积物中营养盐向上覆水的释放量增加, 两者均会诱导水体发生气候变化富营养化。水温升高影响水生有机体的生物过程、物种组成及食物网变化; 水体分层及溶解氧含量降低均会增加水体营养物负荷, 促进水体浮游藻类种群发生变化; 水温变化还会改变水生植物生长条件、生物量及分布, 影响水体中鱼类的生存、生长发育, 以及栖息地发生变化, 使水生无脊椎动物种群数量减少。因此, 水温增加势必对水生生态系统产生重要影响。

关键词: 水温升高; 缺氧; 分层; 栖息地变化; 气候诱导富营养化

中图分类号: Q89 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2020)01-0100-10

水温是水生生态系统一个重要水质指标, 能对水生生物个体、种群、群落、生态系统等在不同层次上产生影响(Woodward et al, 2010), 影响水体化学反应速率、溶解氧(DO)含量、水生动植物的生长及死亡(Gooseff et al, 2005)。水温变暖还可能间接导致水体营养盐负荷增加(特别是磷), 促进藻类大量繁殖, 影响生物功能及水质(Cosgrove & Cosgrove, 2012; Dokulil & Teubner, 2012), 引起气候诱导富营养化(Dokulil & Teubner, 2011; Dokulil, 2014)。水温升高对湖泊水质和生态系统具有重要的影响, 它直接影响物种及栖息地分布(Fang & Stefan, 1999); 影响水生动植物的新陈代谢及污染物的毒性, 高纬度地区湖泊的冰冻期也将发生变化(Fang & Stefan, 1999)。

影响水温变化的主要气象因子有气温、相对湿度、风速等。其中空气直接与水面接触, 以长波辐射及感热交换直接作用于水体, 因此, 气温对水温的影响最大, 两者呈正相关关系(白振营, 1999)。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次报告, 二氧化碳、甲烷和氧化亚氮等温室气体浓度已上升到过去80万年以来前所未有的水平(IPCC, 2013)。美国国家海洋大气局2016年公布的最新数据显示, 当

前大气CO₂浓度已达到402.59 ppm (Li et al, 2016), 全球陆地和海洋平均表面温度在1901-2012年期间已升高0.89℃ (IPCC, 2013)。全球气温变化将导致水温变化(Hardenbicker et al, 2017), 全球变暖已经严重影响到海洋和内陆水体, 引起许多湖泊和河流水温上升, 直接影响水体的理化性质(Dokulil, 2014), 从而给水生态系统带来一系列负面影响(Gooseff et al, 2005)。与陆地生态系统相比, 水生生态系统对气候变化的响应更敏感和脆弱(Orlowsky & Seneviratne, 2011; 于革等, 2013; Hardenbicker et al, 2017), 水生生物的生理、种群丰度、群落结构和食物网结构都与水温密切相关(Shimoda et al, 2011), 因此, 水温升高势必对水生生态系统产生重要影响(Fang & Stefan, 1999)。

1 水温变化现状与趋势

1.1 水温变化现状

湖泊表层水温是一个重要的指标, 气候变化背景下, 全球很多河流及湖泊水温较工业革命前均有所上升。研究揭示自1960s以来, 欧洲、北美、亚洲地表水温增加了0.2~2℃ (Singh & Mishra, 2014)。在北美, 最近100年来, 五大湖中密西根湖和休伦湖表层水温增长率为0.065℃/a和0.086℃/a, 苏必利尔湖夏季(7-9月)表层水温增加了3.5℃, 最近30年上升最多(Austin & Colman, 2007; Austin & Colman, 2008)。在欧洲, 1983-2000年日内瓦湖变暖层水温增长率为0.059℃/a (Gillet & Quetin,

收稿日期: 2018-01-10

基金项目: 教育部人文社会科学研究一般项目(15YJCZH167); 国家自然科学基金项目(41105113)。

作者简介: 王锦旗, 1976年生, 男, 博士, 副教授, 主要从事大气环境因子对水生生态系统的影响。E-mail: w_j_q@sina.com。

2006);1969-2006年,德国北部 Plusszee 湖变温层增温 $0.06\sim 0.08^{\circ}\text{C}/\text{a}$ (Rösner et al,2012);在俄罗斯联邦卡累利阿共和国中南部三个湖泊,水温增暖趋势为 $0.029\sim 0.032^{\circ}\text{C}/\text{a}$ (Efremova et al,2016);1976-2008年,俄罗斯最大水库之一雷宾斯克水库 7 月表层水温增长率为 $0.089^{\circ}\text{C}/\text{a}$ (Litvinov & Zakonova,2012)。在亚洲地区,1970-1995 年贝加尔湖水温增加率为 $0.054^{\circ}\text{C}/\text{a}$ (Shimaraev,2008);在中国,气候变化对湖泊水温的影响同样显著。20 世纪 90 年代以来,云南抚仙湖水温普遍升高,1994-2007 年平均水温比 1967-1993 年增高 0.7°C ,增幅为 4.0% (谷桂华,2008),其中气候变暖是导致水温升高的主要原因(付朝晖,2014)。

河流方面,气候变化导致河流水温升高(Mohseni et al,2003)。2003 年以后,莱茵河水温上升约 2°C (Singh & Mishra,2014)。长江、黄河水温同样受气候变化影响,近 50 年来,金沙江 3 个测站年均水温逐渐增加,变化率约 $0.0063\sim 0.0170^{\circ}\text{C}/\text{a}$,12 月份升幅最大,达 1.8°C (刘昭伟等,2014)。近 50 年来(1956-2006 年)宜昌站年均水温总体增长率为 $0.0197^{\circ}\text{C}/\text{a}$,2000 年以来上升趋势较为明显(郭文献等,2008)。1958-2008 年,黄河上游鄂陵湖-循化水文站河段水温呈明显增加趋势(袁博等,2013)。内陆地区,近 50 年来,伊犁河流域水温呈明显升高的趋势,21 世纪以来平均水温较历年升高 0.85°C ,较 20 世纪 50 年代中后期升高 1.35°C ,夏季水温的升高趋势最为显著。水温与气温的相关关系十分密切,可以认为气温明显升高以及热量条件的变化是引起水温升高的主要原因(夏依木拉提,2009)。

1.2 水温变化趋势预测

随着气候变化加剧,水温升高趋势还会进一步加强。在全球范围内,相对于 1971-2000 年,预计在 IPCC 排放情景特别报告(SRES)-B1(低排放)和 A2(高排放)情景下,2071-2100 年河水平均温度将升高 $0.8\sim 1.6^{\circ}\text{C}$,最高可达 $1.0\sim 2.2^{\circ}\text{C}$ (Van Vliet et al,2013)。预计到 2070 年欧洲湖泊水温增加 2°C ,其中浅水湖泊受到气候变化带来的不利影响风险最高(George et al,2007;Van Vliet et al,2013)。奥地利湖每十年增加 0.4°C (Arvola et al,2009),到 2050 年,奥地利湖水温可能上升 3°C ,与实际观测和世界其他地区的预测一致(Dokulil,2014)。在奥地利最大的湖泊——阿特湖(Attersee),基于 2000-2009 年平均水温,未来增长率预计达 $0.5^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,在当前气候变化水平下,到 2050 年,湖泊表层水温将

增加 $2.4\sim 3.2^{\circ}\text{C}$ (Dokulil,2014)。阿尔卑斯山地区夏季水温增加 3°C (2000-2009),到 2050 年,保守估计平均水温将增加 2°C ,2080-2099 年将以更大的速度增加,达 3.5°C (Dokulil,2014)。除了表层水温升高外,根据历史记录推算,欧洲几个湖泊深水层变暖趋势大约为 $0.1\sim 0.2^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (Dokulil et al,2006)。在美国 27 个湖泊的模拟表明,气候变化预计将使地表水温度增加 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$,预计美国中部地区的湖泊,增温趋势比其他地区更高(Fang & Stefan,1999)。在日本一些水库,基于 1991-2001 年的水温数据,预计 2091-2100 年,表层水温可能增加 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$,深层水温预计增加 2.8°C (Komatsu et al,2007)。

与湖泊一样,河流系统也强烈地受到气候变化的影响。1978-2011 年之间,莱茵河科布伦茨站水温夏季增加了 2°C (ICPR,2013),其中 75% (1.5°C)贡献来自于气候变化(ICPR,2014),以 1961-1990 年为基准,到 2021-2050 年莱茵河年平均水温将增加 $0.6\sim 1.4^{\circ}\text{C}$,到 2071-2100 年预计增幅为 $1.9\sim 2.2^{\circ}\text{C}$,春季约 $0.4\sim 1.3^{\circ}\text{C}$,夏季约 $2.7\sim 3.4^{\circ}\text{C}$ (Hardenbicker et al,2017)。德国几条大河流域(莱茵河、易北河、多瑙河、威悉河及埃姆斯河)在 SRES-A1B(中排放)情景下,与 1981-2010 相比,未来 2031-2060 年和 2061-2090 年水温也将持续增加(Hattermann et al,2015)。加拿大弗雷泽河流域,相对于 1961-1990 年,预测 2071-2100 年夏季水温将增加 1.9°C (Hardenbicker et al,2017)。在美国,与 2001-2010 年相比,2090-2099 年期间,加州 9 条河流水温将有增加趋势,在 A2(高排放)情景达 $2.1\sim 3.5^{\circ}\text{C}$,B1(低排放)情景达 $1.0\sim 1.6^{\circ}\text{C}$,预计水温增加与气温成正比(Luo et al,2013)。

2 水温升高对水体物理、化学性质影响

水生生态系统的物理过程(如热分层),生物和化学过程对温度都十分敏感(Fang & Stefan,2012),水温升高能对水体水文、水动力特征产生一系列影响(Smith et al,2008)。受湖泊特征和季节变化影响,浅水湖泊受到气候变化带来的不利影响风险最高(George et al,2007),较深的湖泊对气候变暖最为敏感(George et al,2007)。因此,了解气候变化对水温的影响是了解气候变化对水生生态系统影响健康的第一步(Fang & Stefan,2012)。

2.1 对水体的直接影响

2.1.1 对水体分层影响 湖泊表层水温是湖泊状

态的指示,强烈影响水化学和水生生态系统(Xiao et al,2013)。随着水温的升高,水体分层将加剧,湖泊、河流等水文特性也随之改变(Fang & Stefan,2012),底层水温增加与湖泊水体分层及水体分层时期也是密切相关的(Fang & Stefan,1999)。

当水体水温上升,水体分层周期也会相应延长。苏黎世湖1947-1998年52年期间,水体表层20 m深的水温变化趋势为 $0.024^{\circ}\text{C}/\text{a}$,水体分层时期增加了2~3周(Livingstone,2003)。德国北部湖泊1969-2006年水温增加使水体分层过早出现,同时也增加春季水体稳定性(Rösner et al,2012)。在未来 $2\times\text{CO}_2$ 气候情景下,水体分层预计更加强烈且持续时间更长(Kraemer et al,2015)。在蒙大拿格拉斯哥附近的深水分层湖泊,气候变化预计将使底层水温增加 2.6°C ,湖底水温最大升温可达 7°C ,湖泊分层将加剧(Fang & Stefan,1999)。Elo等(1998)预测水温变化在 $0.5\sim 2.6^{\circ}\text{C}$ (Dokulil,2014),芬兰湖泊水体分层周期延长30~60d。美国本土一些小型湖泊气候变暖后湖面和湖底之间的最大温差预计增加 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$,在 $2\times\text{CO}_2$ 气候情景下,水体夏季分层的持续时间预计长达66 d(Fang & Stefan,1999)。

相对于贫营养湖泊,气候变化情景下,富营养化湖泊水体分层将比较显著,因为太阳辐射在贫营养化湖泊能渗透至底层,而富营养化湖泊则弱得多(Shimoda et al,2011)。在富营养化湖泊中,太阳辐射随深度衰减较多,通常有 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 温差高于贫营养湖,较大的浅水湖泊表层和底层水温最大差异在 $0.2\sim 2^{\circ}\text{C}$,因此,分层将更加显著(Fang & Stefan,1997; Fang & Stefan,1999)。

2.1.2 对冰河解冻时间的影响 水温增加还使河流、湖泊等水体结冰延迟,解冻提前(Yoo & Odorico,2002)。在北半球(美国北部,欧洲中部和北部)近几十年来气温升高,尤其在冬天和春天,导致结冰推迟,解冻提前(Bernhardt et al,2012)。由于气温升高,俄罗斯最大的几个湖泊(贝加尔湖、拉多加湖、泰梅尔湖)结冰延迟,解冻提早,从而减少冰封时期(Karetnikov & Naumenko,2008)。在卡累利阿共和国8个湖泊,近几十年来(1950-2009年)湖泊结冰时间推迟,最近10 a冰冻时间缩短了11~16 d(Efremova et al,2013)。从1880年以来,俄罗斯的奥涅加湖,河流封冻时间从225 d降至217 d(Ramp et al,2015)。在欧洲,从瑞典中部到德国,冰河解冻时间30年来已经提早了1个月(George

et al,2004;Weyhenmeyer,2004);1961-1990年期间,瑞典北部冰河解冻时间提早10 d,而南部提早约70 d(George et al,2004),芬兰冰河解冻时间提早更多(Korhonen,2006)。在北美,南英格兰地区,加拿大的劳伦大湖地区冰河解冻时间均不同程度提早(Livingstone et al,2010)。

2.2 对水体的间接影响

2.2.1 对水体溶解氧含量的影响 DO浓度被认为是最重要的湖泊水质参数,反映一个水体的整体生态健康状况(Fang & Stefan,1999)。水温升高会降低水体DO含量及增加生物呼吸速率,继而可能会导致更低的DO浓度,尤其在夏季低流量时段(Elshemy,2013)。这种变化也将导致好氧分解氧的需求增加,促进沉积物磷的释放(Komatsu et al,2007)。2003年以后,水温上升造成欧洲默兹河DO含量减少(Singh et al,2014)。未来气候情景下,在 $2\times\text{CO}_2$ 前提下,预计伊利湖七月下层滞流水中DO预计减少 $1\sim 2\text{ mg/L}$ (Blumberg & Di Toro,1990),这些结果与明尼苏达湖泊的研究结果非常相似(Stefan & Fang,1994)。在变温湖泊中DO最大减少到 $<2\text{ mg/L}$,由于气候变暖,下层滞水带DO最大变化可达 8 mg/L ,主要发生在一些深水湖泊的五月或十月,一些浅的常对流湖泊底部DO含量甚至 $<3\text{ mg/L}$ (Hattermann et al,2015)。当水温在 $2\times\text{CO}_2$ 气候情况下,相对深湖泊预计会出现更为强烈水温分层,导致底层DO消耗增加,湖底附近成为更严重的缺氧区(零DO浓度)(Fang & Stefan,1999)。

2.2.2 对水体营养盐的影响 水力停留时间影响湖泊中的磷元素。湖泊水体分层时间超过一年,发生气候诱导富营养化潜力将大大增加(Psenner & Schmidt,1992),因为水体分层时间过长,底层水将长期处于缺氧状态(Magnuson et al,1997),缺氧条件促进沉积物营养盐释放(李庚辰等,2015),尤其是磷的释放,从而提高深水层磷的浓度和总量,并通过翻转输送到表水层(Komatsu et al,2007)。李庚辰等(2015)模拟气候变暖对湖泊沉积物的实验表明,当水温由 18°C 升高至 22.5°C 时,水体正磷酸盐最高可由 0.1 mg/L 升至 0.55 mg/L ,总磷最高可由 0.37 mg/L 升至 0.73 mg/L ;而水温升高对沉积物氮的释放量影响较小。相比之下,较短的水力停留时间,湖泊沉积物磷释放过程比较快,因此有助于减少气候变化引起的富营养化(Smith et al,2008)。

3 水温变化对水生生物的影响

水温升高不仅对水体水文特性、水动力特性产生影响,也对水体 DO 和营养物质产生重要影响,从而间接影响水生生态系统(Arvola et al, 2010)。长时间异常高水温可引发生物有机体的生物过程、物种组成及食物网变化(Orlowsky & Seneviratne, 2011)。水温增加还会影响湖泊和水库的生化过程,也会对河流的纳污能力,有机废弃物的分解产生重要影响(Alavian et al, 2009; Grover, 2015)。

3.1 对浮游植物的影响

一般来说,高水温可能提高浮游植物的生长率和初级生产,也可能增加水体营养物负荷,使富营养程度加剧(Hill & Magnuson, 1990)。水温升高增加水分蒸发,增加营养盐从沉积物中的释放,会影响养分循环和浮游植物动力学(Algesten et al, 2005),进一步促进藻类生长和改变水生态系统(Komatsu et al, 2007)。在瑞典三大湖泊的研究表明,冬季气候与水化学反应之间关系受水表层水温限制(Algesten et al, 2005)。在不久的将来,水温变暖可能会导致流域营养盐负荷增加,尤其是磷,促进藻类大量繁殖,影响水体水质及生物功能,引起气候诱导富营养化(Dokulil & Teubner, 2011; Cosgrove & Cosgrove, 2012; Dokulil & Teubner, 2012),还会增加蓝藻水华暴发几率(Elliott & Defew, 2012)。水华的发生与水体分层密切相关,水温变化引起水体分层变化,引起湖泊底栖和浮游藻类丰度的变化,继而使整个湖泊生态系统受到影响(Sorvari et al, 2002)。大多数温带深水湖泊,水华发生最关键的触发因素是光和湍流,这两个因素都受水体分层的影响(Smith et al, 2008)。在欧洲的湖泊发现,水华发生时间和冬季气候之间具有显著的关系(Gerten & Adrian, 2000; Müller & Wessels, 2010; Weyhenmeyer, 2015)。湖泊水体分层时间超过 1 a,发生气候诱导富营养化潜力将大大增加(Psenner & Schmidt, 1992),因为水体分层时间过长,底层水将长期处于缺氧状态(Magnuson et al, 1997),从而促进沉积物营养盐释放(Petterson et al, 2003),促进表水层浮游植物的生长(Komatsu et al, 2007)。长期分层可以促进有毒蓝藻成为优势种(George et al, 2010),较高的水温延长了分层期,也为较轻的浮游藻类如蓝藻提供了有利条件(Smith et al, 2008);此外,大量团聚的蓝藻种群还可抵御浮游动物捕食,特别是在富营养化湖泊(Smith et al, 2008);在水温

增加前提下,这两种机制均可促进分层湖泊中蓝藻成为优势种(Smith et al, 2008)。德国一个湖泊连续 5 年暖冬导致春季藻类种群的彻底改变,从硅藻和隐藻为优势种变成蓝藻为优势种(Smith et al, 2008)。莱茵河 2003 年夏季,由于水温升高,水体浮游植物数量大幅增加,暴发水华风险也持续增加(Hardenbicker et al, 2017)。在日本岛地川水库,与上世纪 90 年代相比,预计 2090s 地表水温度将增加 3.8℃,深层水将增加 2.8℃,高水温将延长热分层时期,使变温层加深,导致好氧分解过程需氧量的增加,增大水体富营养化发生的几率(Komatsu et al, 2007)。此外,冰河过早解冻能间接影响水体热分层,继而影响水体浮游植物种群结构(Adrian et al, 1999),德国北部的观测发现(Algesten et al, 2005),过早的冰河解冻导致湖泊过早分层,使湖泊藻类组成由以硅藻为主转变为以蓝藻为主。

3.2 对大型水生植物的影响

水温变化能改变水生植物的生长条件(Algesten et al, 2005),改变沉水植物的生物量及分布(Poff et al, 1999; Rooney & Kalff, 2000)。加拿大东部五个湖泊监测结果显示,水温升高增加了沉水植物分布深度,在温暖年份沉水植物生物量较寒冷年份增加了 104%,根据气候变化模式预测,水温变化将导致沉水植物生物量增加、群落分布改变,从而改变北温带湖泊的结构和功能(Rooney & Kalff, 2000)。Cao 等(2014)发现,在水温增加 3℃ 情况下,刺苦草生物量和叶长均增加,叶片叶绿素含量也有所提高;但对处于衰亡期的菹草无显著作用。水温升高还能影响水生植物繁殖体的萌发及生长,使部分水生植物提前萌发并生长,成为水体中的优势种,如伊乐藻(*Elodea Canadensis*)、篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)(Brock & van Vierssen, 1992)。王芳等(2011)模拟 IPCC 2000 年排放方案 SRES-B2(低排放)情景下,未来七星河湿地自然植被总第一净生产力和固碳量呈下降趋势,与近 50 年平均值相比,2020、2050 和 2100 年下降幅度分别为 5.37%、9.91% 和 13.59%。由于水生植物生长受众多环境因素影响,因此,水温升高对大型水生植物的影响存在一定的不确定性。Rip 等(2007)对荷兰两个浅水湖泊进行了观测,结果显示在 20 世纪前 50 年,随着气候变化,水温逐渐升高,降水格局也发生变化,通过地表径流进入水体中的磷也发生变化,水体浊度增加,总体而言,对大型水生植物种群结构并没有显

著影响,种群结构依然稳定。

3.3 对水生动物的影响

3.3.1 对鱼类的影响 水温变化能显著影响鱼类的生存。水温和 DO 浓度是影响鱼类存活和生长的两个最重要的水质参数(Hardenbicker et al,2017),每一种鱼都有致死水温下限及上限(Gooseff et al,2005)和最低 DO 要求(Eaton& Scheller,1996)。在一般情况下,温度会影响鱼类生理过程,继而影响鱼类生长(Algesten et al,2005),因此,水温对鱼类生存是至关重要的。一些亚致死性热损伤包括兴奋过度,平衡失调,和活动能力丧失等,都可能是不可逆转的,最终会导致鱼类死亡(Gooseff et al,2005)。水温也决定了水体可以容纳 DO 含量,水温增加本身可使水体 DO 含量降低(Louge et al,1995),也可导致水体分层加剧,使底层 DO 更低,影响鱼类生存(Fang & Stefan,2012)。在 $2\times\text{CO}_2$ 气候情景下,由于水温增加,在小的深水湖泊底层,水温低于 8°C 时间会更长,对温水性鱼类生存将造成更大威胁(Fang & Stefan,1999);但湖泊结冰时间将延迟和融化提早,冰覆盖时间缩短,可以消除一些浅水湖因冰覆盖引起的水体缺氧,因此也能消除北方一些浅水湖泊鱼类冻死现象(Fang & Stefan,2000)。

水温变化也能显著影响鱼类的生长发育。首先,水温太高,可影响鱼类的死亡率;水温接近 8°C 时,温水性鱼类将停止进食或零星进食,低于最低进食温度或高于最高进食温度时,鱼类将经历零增长或负增长(Fang & Stefan,1999),例如,虹鳟种群在 23°C 水温没有增长(Michaels et al,1995);其次,鱼类的食物供应比鱼本身更容易受水温度波动的影响(Hogg et al,1995),从而影响鱼类种群动态及食性;第三,鱼类产卵和鱼卵发育可能会受到低温阈值的影响,这些影响超过对成鱼的直接影响,例如, 12.8°C 是鳟鱼产卵和卵发育的最高水温(Louge et al,1995)。此外,水温变化不利于鱼的代谢过程及其他生理过程(Louge et al,1995),但也会产生一些积极影响,预计 $2\times\text{CO}_2$ 情景下,北半球温水鱼生长期延伸约 72 d,南半球延伸 1 a,这是气候变暖对温水鱼的积极影响(Fang & Stefan,2012)。

水温变化也会对鱼类栖息地分布产生重要影响。其影响可能是积极的,也可能是消极的(Gooseff et al,2005)。水温变化可以改变鱼类最佳栖息地及永久性改变鱼类群落及渔业生产(Hyenstrand et al,1998)。在美国一些浅水型富营养及中营养湖泊,水温增加将消除部分鱼类冬季冻死现象,

这是水温升高对鱼类栖息地的积极影响(Fang & Stefan,2012)。但对一些冷水性鱼类而言,水温增加会对鱼类栖息地产生消极影响,因为底层水温升高将比表层水温更高,从而消除鱼类潜在的栖息地,在一些浅水和常对流湖泊中,水温增加对鱼类栖息地的影响最大(Fang & Stefan,1999)。在美国,气候变暖背景下,水温增加几乎可消除所有浅水湖泊(最深 4 m)适合冷水鱼的栖息地,对生活在中等深度(最深 13 m)和浅水湖泊中的冷水性鱼类带来最强的负面影响,根据 27 个湖泊调查分析,栖息地减少预计分别高达 45% 和 30%(Fang & Stefan,2012)。此外,热分层的增加导致垂直混合减少,致使底层水缺氧,严重影响水质,也会影响鱼类栖息地(Adrian et al,1999),未来这种影响还将加剧。在 $2\times\text{CO}_2$ 气候情景下,水温升高对水生态系统最大影响是物种分布变化及鱼类栖息地改变(Fang & Stefan,1999)。美国中南部和东南部各州浅水湖泊中,冷水鱼夏季死亡现象将显著扩大(Hattermann et al,2015);当湖泊表层水温超过一些暖水性鱼类热耐受上限时,这些暖水鱼将会消失,其生活的最北界限可能会向高纬度地区移动,而一些寒冷和冷水鱼类生活最南界线也可能向北推(Fang & Stefan,1999)。Schindler 等(1996)人发现气候变化加深了北方湖泊的变温层,鳟鱼栖息地减少。Stefan 等(2001)对北美 209 个湖泊的研究结果表明,在 CO_2 倍增情况下,寒水性和冷水性鱼类的栖息地将急剧减少。除此之外,在 $2\times\text{CO}_2$ 情景下,深水湖泊较强的分层可以使水温更低,为寒水性或冷水鱼类提供更有利条件,但也可能成为更严重的缺氧(零 DO 浓度)区域,从而减少总鱼类栖息地空间(Fang & Stefan,1999)。

3.3.2 对大型无脊椎动物的影响 水温增加对大型无脊椎动物生活及分布有显著影响(Lessard & Hayes,2010)。Habib & Yousuf (2015) 研究发现,升温对大型无脊椎动物总种类数有显著影响,无脊椎动物种类数量由 13 种降低至 2 种,香农多样性指数从 1.8 下降到 0.7。Ganser 等(2015)研究水温升高对 4 种北美成年淡水贻贝的影响时也发现,水温升高对淡水蚌的生理活动带来一系列不利影响,水温升高会显著改变淡水贻贝的代谢率,并减少关键生物过程所需的能量,诸如生存、生长和繁殖等。Weitere 等(2010)在莱茵河通过加热棒将冬季河水温度提高 3°C 后发现,莱茵河的亚洲河蚬(*Corbicula fluminea*)繁殖提高,相对于 2005-2006 年增加了 8

倍, 2007-2008 年增加了 2.6 倍, 在河流中的分布区域也随之扩大。因此, 冬季水温升高可能是亚洲河蚬能在北半球入侵成功的原因之一 (Müller & Baur, 2009; Weitere et al, 2010)。但莱茵河夏季水温增加后河蚬的生长率(体重和壳长)显著下降, 死亡率增加, 因此冬季水温增加的影响正好可以与夏季水温增加的影响抵消 (Weitere et al, 2010)。

4 结论与展望

工业革命后, 温室气体大规模排放, 导致全球气候变暖, 全球水体水温也因此升高, 在未来, 随着气候变化, 水温增加趋势还将加剧。因水温升高, 水体稳定度提高, 垂向对流减少, 分层现象更加严重; 还可以使水体封冻期缩短, 冰冻提前融化。水温升高, 尤其是表层水温升高显著, 水体溶解氧含量随之下降, 由于减少了底层水体与表层水体的交换, 使底层缺氧现象更加严重, 并将导致沉积物中营养盐向上覆水的释放量增加, 两者均会诱导水体发生气候变化富营养化。表层水温升高溶解氧含量减少, 以及冬季水温升高, 冰河解冻提前, 均会促进水体浮游藻类种群发生变化, 有助于密度较小的蓝藻成为优势种群。水温变化能改变水生植物的生长条件, 改变沉水植物的生物量及分布; 水温升高, 以及底层水体缺氧, 均会影响水体中鱼类的生存、生长发育, 使一些寒水性及冷水性鱼类栖息地显著减少; 水温增加对大型无脊椎动物生活及分布有显著影响, 使无脊椎动物种类数量、香农多样性指数降低。

鉴于目前温室气体大量排放, 未来水温变化对水生生态系统影响的重点研究, 可聚焦近几十年来我国水体水温变化状况、水文水资源变化状况, 水生生态系统演变特征, 水温变化对生态系统演化、水文水资源影响程度。模拟不同碳排放情境下, 水体水温变化状况, 水文水资源变化状况, 水生生态系统营养物质变化状况, 包括碳循环、氮循环、氮、磷等营养盐负荷水平等对生物地球化学循环的影响。

在气候变化背景下, 水温升高引发水生生态系统的一系列反应, 对水体生态功能产生影响, 物种分布、种群和群落结构会缓慢发生变化。如何采取应对措施, 是水生态修复工作者未来相当长的时间内必须面对的工作。

参考文献:

白振营, 1999. 一个计算湖泊(水库)自然水温的新公式[J]. 水文, (3): 29-32.

- 付朝晖, 腾威, 纪媛媛, 2014. 抚仙湖水温与气象因子的关系研究[J]. 水资源与水工程学报, (2): 192-194.
- 谷桂华, 2008. 抚仙湖水温特征及趋势分析[J]. 人民珠江, 39(5): 38-39.
- 郭文献, 夏自强, 王鸿翔, 等, 2008. 近 50 年来长江宜昌站水温变化的多尺度分析[J]. 水利学报, 39(11): 1197-1203.
- 李庚辰, 刘足根, 张敏, 等, 2015. 升温对超富营养型浅水湖泊沉积物营养盐动态迁移的影响[J]. 生态学报, 35(12): 4016-4025.
- 刘昭伟, 吕平毓, 于阳, 等, 2014. 近 50 年金沙江干流水温变化特征分析[J]. 淡水渔业, (6): 49-54.
- 王芳, 高永刚, 白鸣祺, 2011. 近 50 年气候变化对七星河湿地生态系统自然植被第一性净生产力的影响[J]. 中国农学通报, 27(1): 257-262.
- 夏依木拉提, 2009. 近 50 年天山西部内流河天然河道水温变化特征[J]. 水文, 29(2): 84-86.
- 于革, 廖梦娜, 李永飞, 2013. 湖泊生态系统对过去 1000 年气候变化的响应研究: 以鄱阳湖生态系统动力学模拟为例[J]. 第四纪研究, 33(6): 1148-1159.
- 袁博, 周孝德, 宋策, 等, 2013. 黄河上游高寒区河流水温变化特征及影响因素研究[J]. 干旱区资源与环境, 27(12): 59-65.
- Adrian R, Walz N, Hintze T, et al, 1999. Effects of ice duration on plankton succession during spring in a shallow polymictic lake[J]. *Freshwater Biology*, 41(3): 621-634.
- Alavian VHA, Qaddumi HH, Dickson E, et al, 2009. Water and climate change: understanding the risks and making climate-smart investment decisions[J]. *World Bank*: 1-174.
- Algesten G, Sobek S, Bergstrom AK, et al, 2005. Role of lakes for organic carbon cycling in the boreal zone[J]. *Global Change Biology*, 10(1): 141-147.
- Arvola L, George G, Livingstone DM, et al, 2010. The impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes.//George, G. 2009. The Impact of Climate Change on European Lakes[C]: 85-101.
- Austin JA, Colman SM, 2007. Lake Superior summer water temperatures are increasing more rapidly than regional air temperatures: a positive ice-albedo feedback[J]. *Geophysical Research Letters*, 34(6): 125-141.
- Austin JA, Colman SM, 2008. A century of temperature variability in Lake Superior[J]. *Limnology & Oceanography*, 53(6): 2724-2730.
- Bernhardt J, Engelhardt C, Kirillin G, et al, 2012. Lake ice phenology in Berlin-Brandenburg from 1947.2007: observations and model hindcasts[J]. *Climatic Change*,

- 112(3): 791 - 817.
- Blumberg A F, Di Toro D M, 1990. Effects of climate warming on dissolved oxygen concentrations in Lake Erie [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 119(2): 210 - 223.
- Brock T C M, van Vierssen W, 1992. Climatic change and hydrophyte-dominated communities in inland wetland ecosystems [J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2 (1/2): 37 - 49.
- Cao Y, Li W, Jeppesen E, 2014 The response of two submerged macrophytes and periphyton to elevated temperatures in the presence and absence of snails: a microcosm approach [J]. *Hydrobiologia*, 738 (1): 49 - 59.
- Cosgrove CE, Cosgrove WJ, 2012. The dynamics of global water futures. Driving forces 2011 - 2050. UNESCO Paris [J]. *Global water futures 2050*.
- Dokulil MT, Jagsch A, George GD, et al. 2006. Twenty years of spatially coherent deep-water warming in lakes across Europe related to the North Atlantic Oscillation [J]. *Limnology and Oceanography*, 51 (6): 2787 - 2793.
- Dokulil MT, Teubner K, 2012. Deep living *Planktothrix rubescens* modulated by environmental constraints and climate forcing [J]. *Hydrobiologia*, 698(1): 29 - 46.
- Dokulil MT, Teubner K. Eutrophication and climate change: present situation and future scenarios. // Ansari AA, Gill SS, Lanza GR, et al. (eds), 2011. *Eutrophication: Causes, Consequences and Control* [C]. Springer, Dordrecht: 1 - 16.
- Dokulil MT, 2014. Predicting summer surface water temperatures for large Austrian lakes in 2050 under climate change scenarios [J]. *Hydrobiologia*, 731(1): 19 - 29.
- Eaton JG, Scheller RM, 1996. Effects of climate change on fish thermal habitat in streams of the United States [J]. *Limnology & Oceanography*, 41(5): 1109 - 1115.
- Efremova T, Palshin N, Zdorovenov R, 2013. Long term characteristics of ice phenology in Karelian lakes [J]. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 62(1): 33 - 41.
- Efremova TV, Pal'shin NI, Belashev BZ, 2016. Water temperature in different types of lakes in Karelia under changing climate based on data of instrumental measurements in 1953 - 2011 [J]. *Water Resource*, 43(2): 402 - 411.
- Elliott JA, Defew L, 2012. Modelling the response of phytoplankton in a shallow lake (Loch Leven, UK) to changes in lake retention time and water temperature [J]. *Hydrobiologia*, 681(1): 105 - 116.
- Elo AR, Huttula T, Peltonen A, et al, 1998. The effects of climate change on the temperature conditions of lakes [J]. *Boreal Environment Research*, 3(2): 137 - 150.
- Elshehy M. Climate change impacts on water resources in semiarid regions: case study of aswan high dam reservoir [R] // Younos T, Grady CA, 2013. *Climate change and water resources*. The Handbook of Environmental Chemistry, 69 - 98.
- Fang X, Psapula R, Stefan HG, 1997. Projections of potential climate change effects on water temperature, dissolved oxygen and associated fish habitat of small lakes in the contiguous U.S., Vol. II - Effects of projected future climate conditions [J]. St. Anthony Falls Laboratory, University of Minnesota, Minneapolis: 234.
- Fang X, Stefan HG, 1999. Projections of climate change effects on water temperature characteristics of small lakes in the contiguous U.S [J]. *Climatic Change*, 42 (2): 377 - 412.
- Fang X, Stefan HG, 2000. Projected climate change effects on winterkill in shallow lakes in the northern contiguous U.S [J]. *Environmental Management*, 25(3): 291 - 304.
- Fang X, Stefan HG, 2012. Impacts of climatic changes on water quality and fish habitat in aquatic systems [R] // Lackner M, Chen WY, Suzuki T, et al. *Handbook of Climate Change Mitigation*: 531 - 569.
- Fang X, Stefan, H G, 1997. Simulated climate changes on dissolved oxygen characteristics in ice-covered lakes [J]. *Ecological Modelling*, 103(2): 209 - 229.
- Ganser AM, Newton TJ, Haro RJ, 2015. Effects of elevated water temperature on physiological responses in adult freshwater mussels [J]. *Freshwater Biology*, 60 (8): 1705 - 1716.
- George DG, Hewitt DP, Lund JW, et al, 2010. The relative effects of enrichment and climate change on the long-term dynamics of daphnia in Esthwaite Water, Cumbria [J]. *Freshwater Biology*, 23(23): 55 - 70.
- George DG, Maberly SC, Hewitt DP, 2004. The influence of the North Atlantic Oscillation on the physical, chemical and biological characteristics of four lakes in the English Lake District [J]. *Freshwater Biology*, 49(6): 760 - 774.
- Gerten D, Adrian R, 2000. Climate-driven changes in spring plankton dynamics and the sensitivity of shallow polymictic lakes to the North Atlantic Oscillation [J]. *Limnology & Oceanography*, 45(5): 1058 - 1066.
- Gillet C, Quetin P, 2006. Effect of temperature changes on the reproductive cycle of roach in Lake Geneva from 1983 to 2001 [J]. *Journal of Fish Biology*, 69(2): 518 - 534.

- Gooseff M N, Strzepek K, Chapra SC, 2005. Modeling the potential effects of climate change on water temperature downstream of a shallow reservoir, lower madison river, MT[J]. *Climatic Change*, 68(3):331 - 353.
- Grover V I, 2015. Impact of climate change on the water cycle[J]. Springer International Publishing, 66(1 - 2): 3 - 30.
- Habib S, Yousuf AR, 2015. Impact of elevated water temperature on phytophilous macroinvertebrate community of an eutrophic lake in Kashmir Himalayas[J]. *International Journal of Current Research*, 6 (2): 5181 - 5183.
- Hardenbicker P, Viergutz C, Becker A, et al, 2017. Water temperature increases in the river Rhine in response to climate change[J]. *Regional Environmental Change*, 17 (1): 299 - 308.
- Hattermann FF, Huang S, Koch H, 2015 .Climate change impacts on hydrology and water resources[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 24(2): 201 - 211.
- Hill DK, Magnuson JJ, 1990. Potential effects of global climate warming on the growth and prey consumption of great lakes fish[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 119(2):265 - 275.
- Hogg ID, Williams DD, Eadie JM, et al, 1995. The consequences of global warming for stream invertebrates: A field simulation[J]. *Journal of Thermal Biology*, 20(1 - 2): 199 - 206.
- Hyenstrand P, Blomqvist P, Pettersson A, 1998. Factors determining cyanobacterial success in aquatic systems-a literature review. *Archiv Fur Hydrobiologie Spec Issues Advances in*, 51: 41 - 62.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Fifth assessment report: Climate change 2013[R]. 2013.
- International Commission for the Protection of the Rhine (ICPR), 2013. Development of Rhine water temperatures based on validated temperature measurements between 1978 and 2011[R]: 1 - 26.
- International Commission for the Protection of the Rhine (ICPR), 2014. Estimation of the effects of climate change scenarios on future Rhine water temperature development. International ommission for the Protection of the Rhine ,ICPR-Report No. 214[R].
- Karetnikov SG, Naumenko MA, 2008. Recent trends in Lake Ladoga ice cover[J]. *Hydrobiologia*, 599(1): 41 - 48.
- Komatsu E, Fukushima T, Harasawa H, 2007. A modeling approach to forecast the effect of long-term climate change on lake water quality[J]. *Ecological Modelling*, 209(2 - 4): 351 - 366.
- Korhonen J, 2006. Long-term changes in lake ice cover in Finland[J]. *Water Policy*, 37(4 - 5): 347 - 363.
- Kraemer BM, Anneville O, Chandra S, et al, 2015. Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change[J]. *Geophysical Research Letters*, 42(12): 4981 - 4988.
- Lessard JAL, Hayes DB, 2010. Effects of elevated water temperature on fish and macroinvertebrate communities below small dams[J]. *River Research & Applications*, 19 (7): 721 - 732.
- Li W, Xu X, Fujibayashi M, et al, 2016. Response of microalgae to elevated CO₂ and temperature: impact of climate change on freshwater ecosystems[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 23 (19): 19847 - 19860.
- Litvinov AS, Zakonnova AV, 2012. Thermal regime in the Rybinsk Reservoir under global warming[J]. *Russian Meteorology and Hydrology*, 37(9): 640 - 644.
- Livingstone DM, 2003. Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake[J]. *Climatic Change*, 57(1): 205 - 225.
- Livingstone DM, Adrian R, Blenckner T, et al. Lake Ice Phenology[R] //D.G. George (ed.) , 2010. The Impact of Climate Change on European Lakes, *Aquatic Ecology Series 4*, 51 - 61.
- Louge J, Tiku P, Cossins AR, 1995. Heat injury and resistance adaptation in fish[J]. *Journal of Thermal Biology*, 20(1 - 2): 191 - 197.
- Luo YZ, Ficklin DL, Liu XM, et al, 2013 .Assessment of climate change impacts on hydrology and water quality with a watershed modeling approach[J]. *Science of the Total Environment*, 450 - 451(16): 72 - 82.
- Magnuson J J, Webster K E, Assel R A, et al, 1997. Potential effects of climate changes on aquatic ecosystems: Laurentian Great Lakes and Precambrian Shield Region [J]. *Hydrological Processes*, 11(8): 825 - 871.
- Michaels G, O'Neal K, Humphrey J, et al, 1995. Ecological impacts from climate change: an economic analysis of freshwater recreational fishing[R]. Report by office of planning and evaluation. EPA - 230 - R - 95 - 004, Environmental Protection Agency, Washington DC.
- Mohseni O, Stefan HG, Eaton JG, 2003. Global warming and potential changes in fish habitat in U.S. Streams[J]. *Climatic Change*, 59(3): 389 - 409.
- Morrison J, Quick MC, Foreman MGG, 2002. Climate change in the Fraser River watershed: flow and temperature projections[J]. *Journal of Hydrology*, 263(1 - 4): 230 - 244.

- Müller A, Wessels W, 2010. The flood in the Odra River 1997 – Impact of suspended solids on water quality[J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 27(5): 316 – 320.
- Müller O, Baur B, 2009. Survival of the invasive clam *Corbicula fluminea* (müller) in response to winter water temperature[J]. *Malacologia*, 53(2): 367 – 371.
- Orlowsky B, Seneviratne S I, 2011. Investigating spatial climate relations using CARTs: an application to persistent hot days in a multimodel ensemble[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(D14): 263 – 294.
- Pettersson K, Grust K, Weyhenmeyer G B, et al, 2003. Seasonality of chlorophyll and nutrients in Lake Erken: effects of weather conditions[J]. *Hydrobiologia*, 506 – 509(1): 75 – 81.
- Poff N, Brinson MM, Day JW, 1999. Potential impacts on inland freshwater and coastal wetland ecosystems in the United States[J]. *Contact Dermatitis*, 40(6): 335 – 336.
- Psenner R, Schmidt R, 1992. Climate-driven pH control of remote Alpine lakes and effects of acid deposition[J]. *Nature*, 356(6372): 781 – 783.
- Ramp C, Delarue J, Palsbøll PJ, et al, 2015. Adapting to a warmer ocean-seasonal shift of baleen whale movements over three decades[J]. *Plos One*, 10(3): e0121374.
- Rip W J, Ouboter M R, L, Los H J, 2007. Impact of climatic fluctuations on characeae biomass in a shallow, restored lake in The Netherlands[J]. *Hydrobiologia*, 584: 415 – 424.
- Rooney, N, Kalff J, 2000. Inter-annual variation in submerged macrophyte community biomass and distribution: the influence of temperature and lake morphometry[J]. *Aquatic Botany*, 68(2): 321 – 335.
- Rösner RR, Müller-Navarra DC, Zorita E, 2012. Trend analysis of weekly temperatures and oxygen concentrations during summer stratification in Lake Plußsee: A long-term study[J]. *Limnology & Oceanography*, 57(5): 1479 – 1491.
- Schindler DW, 1996. Widespread effects of climate warming on freshwater ecosystems in North America[J]. *Hydrological Processes*, 11(8): 1044 – 1069.
- Shimaraev MN, 2008. Influence of the north atlantic oscillation on ice-thermal processes in Lake Baikal[J]. *Doklady Earth Sciences*, 423(2): 1418 – 1422.
- Shimoda Y, Azim ME, Perhar G, Ramin M, et al, 2011. Our current understanding of lake ecosystem response to climate change: what have we really learned from the north temperate deep lakes? [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 37(1): 173 – 193.
- Singh VP, Mishra AK, Chowdhary H, et al, 2014. Climate change and its impact on water resources[J]. *Humana Press*, 1(5): 525 – 569.
- Smith B, Aasa A, Ahas R, et al, 2008. Climate-related change in terrestrial and freshwater ecosystems [J]. *Springer Berlin Heidelberg*: 221 – 308.
- Sorvari S, Korhola A, Thompson R, 2002. Lake diatom response to recent Arctic warming in Finnish Lapland[J]. *Global Change Biology*, 8(2): 171 – 181.
- Stefan H G, Fang X, 1994. Model simulations of dissolved oxygen characteristics of Minnesota lakes: past and future[J]. *Environmental Management*, 18(1): 73 – 92.
- Stefan HG, Fang X, Eaton JG, 2001. Simulated fish habitat changes in North American lakes in response to projected climate warming[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 130(3): 459 – 477.
- Van Vliet MTH, Franssen WHP, Yearsley JR, et al, 2013. Global river discharge and water temperature under climate change[J]. *Global Environmental Change*, 23(2): 450 – 464.
- Weitere M, Vohmann A, Schulz N, et al, 2010. Linking environmental warming to the fitness of the invasive clam *Corbicula fluminea*[J]. *Global Change Biology*, 15(12): 2838 – 2851.
- Weyhenmeyer GA, 2004. Synchrony in relationships between the North Atlantic Oscillation and water chemistry among Sweden's largest lakes[J]. *Limnology & Oceanography*, 49(4): 1191 – 1201.
- Weyhenmeyer GA, 2015. Warmer winters: Are planktonic algal populations in Sweden's largest lakes affected? [J]. *Ambio*, 30(8): 565 – 571.
- Woodward G, Perkins DM, Brown LE, 2010. Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 365(365): 2093 – 2106.
- Xiao F, Ling F, DU Y, et al, 2013. Evaluation of spatial-temporal dynamics in surface water temperature of Qinghai Lake from 2001 to 2010 by using MODIS data [J]. *Journal of Arid Land*, 5(4): 452 – 464.
- Yoo JD, Odorico P, 2002. Trends and fluctuations in the dates of ice break-up of lakes and rivers in northern Europe: the effect of the North Atlantic oscillation [J]. *Journal of Hydrology*, 268(1 – 4): 100 – 112.

Effects of Increasing Water Temperature on Water Properties and Aquatic Organisms: A Critical Review

WANG Jin-qi, SONG Yu-zhi, HUANG Jin

(School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, P.R.China)

Abstract: Global warming has resulted in continuously increasing water temperatures in most lakes and rivers, and this warming trend will intensify with climate change. Changes in water temperature have a significant impact on aquatic ecosystems and it is therefore important to study the influence of water temperature changes on these critically important ecosystems. In this study, we analyzed the trend of increasing water temperature and summarized the effects of elevated water temperature on the properties of water itself and on aquatic organisms. Global water temperatures have increased from 0.2°C to 2°C and will continue to increase in the future due to climate change. With increased surface water temperature, water bodies become more stable as thermal stratification strengthens and vertical convection weakens. Rivers and lakes freeze later and thaw earlier, shortening the time of ice cover. Further, increased water temperature reduces the solubility of oxygen, reducing dissolved oxygen, exacerbating bottom water hypoxia and increasing nutrient release from sediments. Both reduced mixing and increased nutrient release promote climate-induced eutrophication. The increase in water temperature affects biological processes, species composition and the food web structure of aquatic ecosystems. Thermal stratification of water bodies and decreased dissolved oxygen will increase nutrient loading, altering phytoplankton community structure, growth conditions and the biomass and distribution of aquatic plants. Rising water temperatures will also reduce the number of aquatic invertebrates and affect the survival and growth of fish and fish habitat. Rising water temperatures are impacting aquatic ecosystems and the impacts will become more severe.

Key words: elevated water temperature; hypoxia; stratification; habitat alteration; climate-induced eutrophication