

# 气候变化对鲑鱼丰富度和繁殖影响的研究进展

王志萍<sup>1</sup>, 李家薰<sup>1</sup>, Dave Fillion<sup>2</sup>, 霍耀明<sup>3</sup>, 周文慧<sup>4</sup>

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210046; 2. 圣地亚戈野生动物园, 加利福尼亚 92027; 3. 成功大学环境工程研究所, 台湾 台南 701; 4. 复旦大学 环境科学与工程系, 上海 200082)

**摘要:** 鲑鱼是人类重要的食品来源之一, 具有巨大的经济价值。同时, 鲑鱼资源通过输送营养物质对维持溪流和陆地生态系统的结构、功能和过程等有重要作用。而鲑鱼是对温度极为敏感的冷水性鱼类, 对气候变化的反应尤为明显。作者通过文献综述法梳理相关研究, 从气候变化引起的温度变化、淡水和海洋环境的变化以及鱼病传播 4 个方面探讨对鲑鱼丰富度和繁殖的影响, 并提出研究展望。研究显示: 温度变化对鲑鱼的产卵和迁徙有较大影响; 溪流和河流流量的改变会影响鲑鱼的迁徙和幼年鲑鱼的存活数量; 温度和二氧化碳浓度的变化使海洋食物供应减少, 鲑鱼丰富度降低; 水温的升高使病原体增加, 鲑鱼死亡率增加。本研究成果可为鲑鱼种群应对气候变化的研究及管理提供一定的理论支持。

**关键词:** 鲑鱼; 气候变化; 丰富度; 繁殖

**中图分类号:** X171 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3096(2019)04-0098-07

**DOI:** 10.11759/hyxx20180929001

鲑鱼是数种鲑科鱼类中文的通称<sup>[1]</sup>, 文中讨论的鲑鱼主要包含大西洋鲑(*Salmo salar*)和太平洋鲑属(*Oncorhynchus* spp.), 包括大麻哈鱼(*O. kisutch*)、大鳞大麻哈鱼(*O. tshawytscha*)、银大麻哈鱼(*O. kisutch*)、马苏大麻哈鱼(*O. masou*)、细鳞大麻哈鱼(*O. gorbuscha*)和红大麻哈鱼(*O. nerka*)等。2018 年联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations)全球鱼贸易数据表明, 鲑鱼是贸易额最高的鱼类商品, 是日本、加拿大、美国和俄罗斯等国家重要的渔业经济收入来源之一<sup>[2]</sup>。此外, 鲑鱼资源在各自的生态系统中也很重要。其可为大量食肉动物, 包括鲸鱼、水獭、鸟类、海豹、熊和许多无脊椎动物等提供食物, 并在溯源回流产卵死亡腐烂后为许多陆生植物和动物提供营养物质。鲑鱼在提供食物的同时, 将营养物质从海洋运输到淡水栖息地, 对维持溪流和陆地生态系统的结构、功能和过程等有重要作用<sup>[3]</sup>。

气候变化能以不同的方式影响地球上的许多物种<sup>[4-6]</sup>, 大气和海洋温度的持续升高, 可能会导致物种丰度的变化<sup>[7-9]</sup>。水温的变化可以直接影响鱼类的生理过程<sup>[10]</sup>、迁徙行为以及对疾病和寄生虫的抵抗力等<sup>[11, 12]</sup>。冷水性鲑鱼是一种受气候变化严重影响的物种<sup>[4, 13]</sup>, 已有许多国外研究表明气候变化造成鲑鱼丰富度的降低<sup>[14-17]</sup>。还有研究证明, 气候变化所

引起的温度和水环境的变化会直接影响鲑鱼的丰富度<sup>[18-19]</sup>。可见, 大多数鲑鱼未来将会受到气候变化的负面影响。

国内关于气候变化与鲑鱼的研究较少, 梁雄伟等<sup>[20]</sup>曾讨论过气候变化对鲑鳟鱼类生物学方面的影响; 张一新等<sup>[3]</sup>曾指出, 鲑鱼是河流-陆地生态系统的一种资源补贴。但是, 关于气候变化对鲑鱼丰富度和繁殖的影响研究进展却鲜见报道。因此, 开展气候变化对鲑鱼丰富度和繁殖的影响综述研究对保护海洋渔业资源以及河流-陆地生态系统具有重大的意义。作者综述了鲑鱼对气候变化所引起的温度、淡水条件、海洋条件和病原体的变化的反应, 以期为未来的鲑鱼种群研究及管理如何应对气候变化提供理论基础和数据支持。

## 1 鲑鱼的分布和生命周期

鲑科鱼类广泛分布于世界各地, 例如, 太平洋鲑鱼栖息在俄罗斯和阿拉斯加的沿海上游河流中,

收稿日期: 2018-09-29; 修回日期: 2018-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701608)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41701608]

作者简介: 王志萍(1995-), 女, 福建建瓯人, 硕士研究生, 主要从事土地管理与自然资源评价研究, 电话: 13380190793, E-mail: zhiping-wang17@163.com; 李家薰, 通信作者, 电话: 15261435716, E-mail: candy01292001@gmail.com

一直延伸到日本和墨西哥<sup>[4]</sup>。大西洋鲑鱼生活在美国、加拿大、挪威、瑞典、芬兰、冰岛和英国的部分地区<sup>[4]</sup>(图 1)。

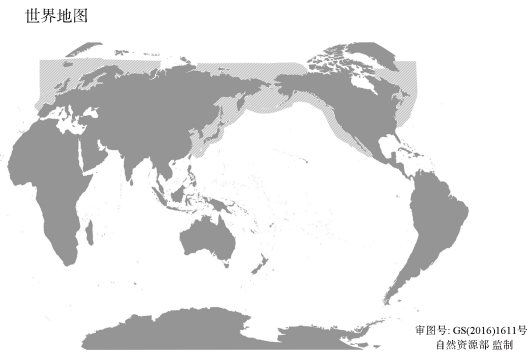


图 1 鲑鱼的世界分布图<sup>[4]</sup>  
Fig. 1 The global distribution of salmon

大多数鲑鱼都是溯河洄游的，它们在海洋里生长发育，之后又回到淡水中繁衍，在生命的不同阶

段在两者之间迁徙<sup>[19]</sup>。但不同种类的鲑鱼因生活区域的不同而行为习惯各异，其生命周期也有所不同(图 2)。具体来说，鲑鱼的生命周期开始于受精卵，成年雌性鲑鱼在砾石中产下红色的鲑鱼卵，随后由附近成年雄性鲑鱼完成受精。大约 3 个月，受精卵会孵化，仔鱼在孵化后的前几个星期仍然依靠卵黄囊进行营养供给。而当仔鱼在淡水河流中发育成稚鱼，它们将开始降海迁移。在这个过程中，它们的身体不断变化，稚鱼发育为幼鱼，以适应未来的海洋环境。因种类而异，这些幼鱼可能会留在淡水湖泊、池塘或河口长达 4 年之久。刚进入海洋时，幼鱼最容易被捕食，而进入海洋后的幼鱼以浮游生物为食。它们将在海洋中生活至少 1~5 年直到性成熟，具体时间取决于鲑鱼的种类。之后，成年鲑鱼迁徙回到出生地产卵，开始了新的一个生命世代的循环<sup>[4]</sup>。鲑鱼生命周期的每个阶段都可能受到气候变化的影响，因此了解鲑鱼生命周期以及不同种类间的差异非常重要。

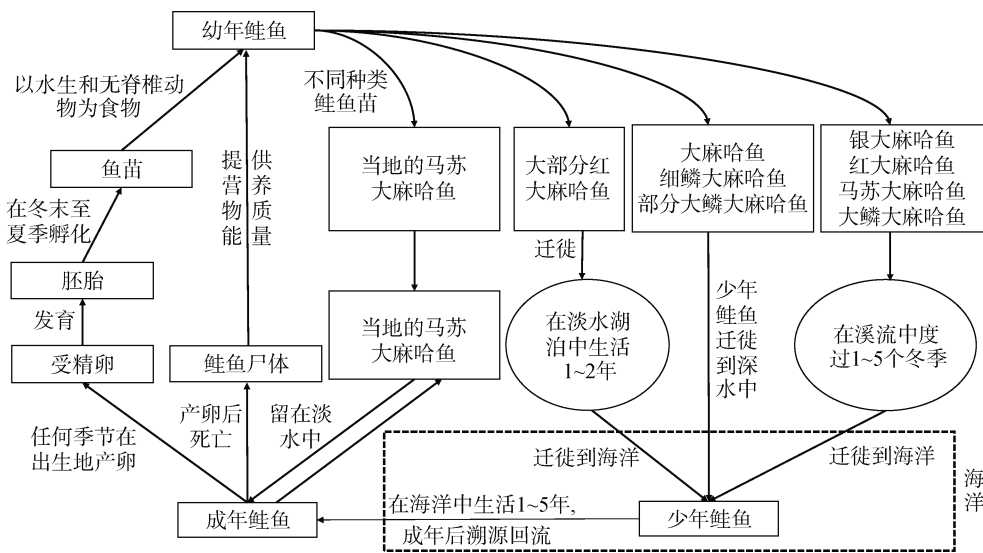


图 2 鲑鱼的生命周期<sup>[21]</sup>  
Fig. 2 The life cycle of salmon

## 2 气候变化对鲑鱼丰富度和繁殖的影响

### 2.1 温度

温度改变是气候变化最直接的反映，其对鲑鱼有较大影响。有研究表明夏秋季节最高水温的升高会降低幼年鲑鱼的存活率，而春冬季变暖则会提高鲑鱼的发育速度<sup>[21-22]</sup>。许多鲑鱼的大部分时间都生活在平均水温低于 6.5℃ 的冷水中<sup>[23]</sup>。幼年鲑鱼的最

适生长水温如表 1 所示，从中可以发现，最适生长水温均低于 20℃。另外，成年鲑鱼长时间暴露在 21℃ 以上的水温中是致命的<sup>[24]</sup>。温度对鲑鱼的影响主要表现在产卵和迁徙时间上。

#### 2.1.1 温度变化对鲑鱼产卵的影响

鲑鱼的产卵时间取决于成年鲑鱼忍受夏季高温的能力以及鱼卵的质量。在鲑鱼的整个生命周期里，鱼卵的耐热性最低。如果长时间暴露于超过 8℃ 的水温中，几乎没有鱼卵可以存活<sup>[23]</sup>。因此，鲑鱼卵的存活率下降可能是气候变化导致温度上升的第一个迹

表 1 幼年鲑鱼最适生长水温

Tab. 1 Optimal temperature required for the growth of parr salmon

种类	最适生长水温(°C)	资料来源
大西洋鲑鱼	16~20	[25] [26]
大鳞大麻哈鱼	15	[27] [28]
银大麻哈鱼	12~15	[29] [30]
红大麻哈鱼	15	[29]

象<sup>[31]</sup>。如果温度以目前的速度上升,爱尔兰和英国的冬季溪流水温预计将超过鲑鱼卵存活的致命极限<sup>[17]</sup>。Crozier<sup>[31]</sup>研究发现,在1950~2010年间,哥伦比亚河鲑鱼的秋季产卵时间整整提前了1周,这期间的水温在同一时期增加了约2°C。这50 a里,随着河流,海洋和空气温度的升高,鲑鱼产卵的时间平均每10 a提前了2.5 d<sup>[31]</sup>。此外,鲑鱼的发育速度也与水温有关,水温决定了鲑鱼胚胎发育持续时长。某些种类的鲑鱼的发育速度将随着温度的升高而加快,但有一定

的阈值<sup>[19]</sup>。如果水温升高超过一定的阈值,水中的氧含量下降,水压增加,可能导致鲑鱼丰富度下降。

### 2.1.2 温度变化对鲑鱼迁徙的影响

温度变化均会对鲑鱼向上游迁徙回溪流(产卵地)和下游迁徙入海产生影响。水温会决定鲑鱼上游迁徙回产卵地的数量和时间。从图3中可以看出,美国的格拉尼特大坝上游迁徙的成年大鳞大麻哈鱼数量减少与夏季水温升高有关,大部分鲑鱼会在夏季水温高于20°C之前迁徙,当水温高于20°C,迁徙的鲑鱼数量最少。这种迁徙模式可能受到气候变化的影响,与Naughton等<sup>[32]</sup>的研究结果相似。Quinn等<sup>[33]</sup>发现,大鳞大麻哈鱼在过去的一个世纪中体现出越来越早的迁移趋势。与这预测相一致,犹他州的邦纳维尔水坝7月平均温度的升高使得大鳞大麻哈鱼和红大马哈鱼向上游迁徙回产卵地的时间提早<sup>[31]</sup>。此外,温度还会影响鲑鱼向下游迁徙入海。如大鳞大麻哈鱼鲑鱼下游迁移期间的存活率与13°C以上的温度呈负相关<sup>[17]</sup>。

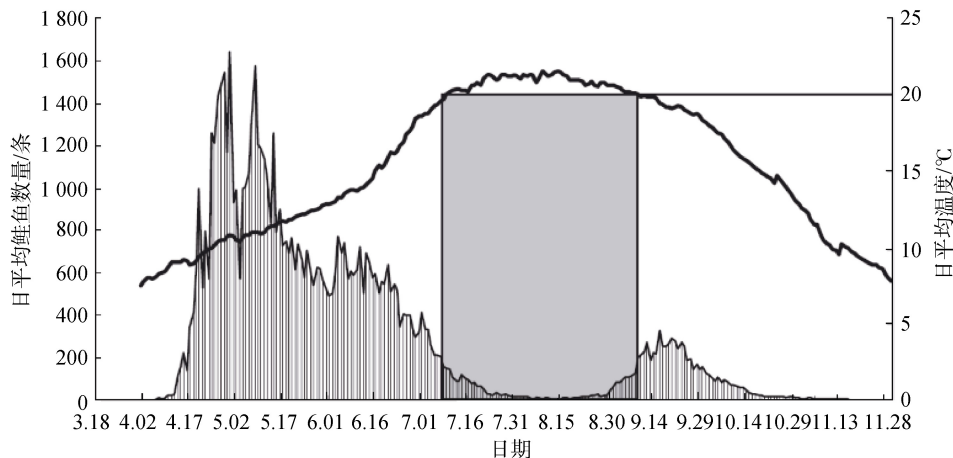


图3 1995~2006年格拉尼特大坝日平均迁徙鲑鱼数量和水温的关系<sup>[21]</sup>

Fig. 3 Relationship between average daily migration of salmon population and water temperature at Lower Granite Dam from 1995 to 2006

然而,水温升高并不一定会伤害所有的鲑鱼。在阿拉斯加,持续较高的水温有利于鲑鱼的丰富度,但在美国西北部它却减少了鲑鱼的丰度<sup>[24]</sup>。总体而言,鲑鱼对周围环境条件非常敏感,水温的升高会使得适合其生活的栖息地变少<sup>[34]</sup>,并且随着水温的升高,越来越多的鲑鱼正将其栖息地向北迁移至较冷的地区以补偿温度差异<sup>[35]</sup>。尽管这可能对某些鲑鱼种类有益,但也可能会产生相反的效果。

## 2.2 淡水环境的变化

鲑鱼有部分时间是在淡水中度过的,如果气候

发生变化,会影响溪流和河流的环境。有许多气候和水文模型预测到未来淡水栖息地对鲑鱼的不利条件,包括较高的河流温度和河口温度,夏季和秋季的河流流量减少,以及因冰雪融化导致冬季溪流洪水的增加等<sup>[24, 36-37]</sup>。

在气候干燥地区,夏季某些河流或溪流流量减少甚至出现断流,依靠其向上游迁徙回出生地进行交配的鲑鱼数量将减少,影响鲑鱼的产卵和繁殖。Walsh等<sup>[38]</sup>预测到在某些地区鲑鱼的流动频率可能会减少约50%。如果这种趋势如预期那样发生,成年鲑鱼将不能到达其产卵地,这将显著降低这些地区

鲑鱼的丰富度。此外，幼鱼需要生活在浅而流速快的淡水中，气候变化造成冬季有更多的冰川融化到河流中，使得少年鲑鱼在到达海洋之前的生存环境变差，将导致其丰富度下降。有证据表明，在 20 世纪 90 年代，额外的湿润泉水在北爱尔兰造成了更高的河流流量，导致大西洋鲑鱼存活率降低<sup>[38]</sup>。还有学者预测，在当前的气候变化影响下，2070~2099 年间，美国喀斯喀特山附近河流的月最大流量会增加 10%~60%，将极大影响鲑鱼的栖息地<sup>[39]</sup>。

### 2.3 海洋环境的变化

近年来，越来越多的研究证明分布海区表层水温与鲑鱼丰富度有关。如 Crozier<sup>[31]</sup>发现北太平洋表

层水温会影响太平洋鲑鱼种群丰富度以及 6~12 月份进入海洋的鲑鱼的生长速度；格鲁吉亚海峡在过去 100 年中海水表层温度上升 1℃，使得所有弗雷泽河鲑鱼的库存下降。而 Mote<sup>[24]</sup>通过标记实验证明，鲑鱼受海洋温度的影响主要是通过代谢率和食物可获得性实现的。由此可见，海洋环境的变化对鲑鱼的影响主要反映在食物供应上。如图 4 所示，当幼鱼迁徙到海洋时，他们面临许多挑战，包括避免像海鸟、大型鱼类和海洋哺乳动物这样的新捕食者，以及立即需要食物(浮游动物)，而浮游动物主要以浮游植物为食。可见，幼鱼迁徙入海时除依赖春季上升流，还需要海上繁茂生长的浮游植物，而这些都受到气候条件的影响<sup>[24]</sup>。

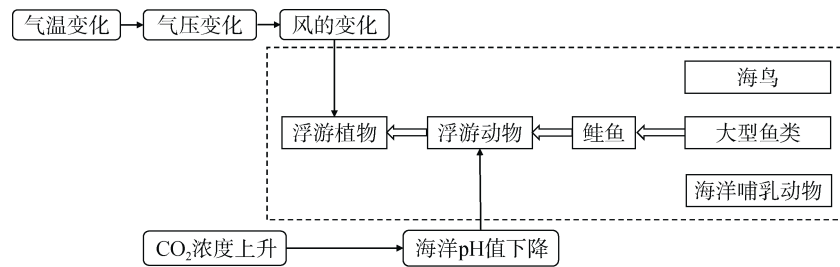


图 4 气候变化与鲑鱼食物供应的关系

Fig. 4 Relationship between climate change and food supply of salmon

了解鲑鱼在海洋食物网中的作用对于发现气候变化对鲑鱼的潜在影响十分重要。Beaugrand 等<sup>[40]</sup>将气候变化与浮游植物和浮游动物分布的变化以及北大西洋鲑鱼的变化联系起来，即将 3 个营养级别的长期变化与北半球温度(Northern Hemisphere temperatures, NHT)、北大西洋空气压力振荡(North Atlantic air pressure oscillations, NAO)和海洋表层水温联系起来。北风是春季上升流的主要驱动力，它通过自下而上的效应为整个食物网提供营养<sup>[24]</sup>。气压是形成风的原因，而浮游植物的上涌需要风的驱动，可见，NAO 是浮游植物丰度最好的预测因子。而浮游动物直接摄食浮游植物，许多鲑鱼食用这些浮游动物，因此，如果气候变化通过风的变化影响浮游植物的上涌，将通过影响鲑鱼的食物网来改变鲑鱼的丰度和分布。此外，海洋酸化也会影响鲑鱼的食物供应。由于人类的排放，空气中二氧化碳浓度增加，海洋 pH 值下降<sup>[40]</sup>。而海洋 pH 值的降低会直接影响到一些甲壳类动物合成外壳的能力，而这些动物大多都是海洋中成年和幼年鲑鱼的食物供应源。

### 2.4 温度对鲑鱼疾病传播的影响

气候变化对冷水性鲑鱼疾病传播有重要影响。

有研究发现一些鲑鱼病原体(粘孢子虫(*Myxosporea*)、气单胞菌(*Aeromonas*)等)的毒性会随着温度的升高而变强<sup>[41]</sup>，可能是因为鲑鱼在短时间的高温胁迫下，宿主抵抗力较弱，而病原体增长速率较高<sup>[42]</sup>。通过将某些鲑鱼病原体置于其最佳发病温度范围内的实验发现，水温升高会增加传染病爆发的可能性<sup>[31, 42]</sup>。温度升高造成的高柱状杆菌(*Flavobacterium columnare*)感染率可能是造成 20 世纪 60 年代哥伦比亚河大麻哈鱼和红大麻哈鱼数量减少的主要原因<sup>[43]</sup>。在 2000 年前后，由于温度升高，病原体增加，美国和加拿大海域鲑鱼死亡数量比往年明显增加<sup>[44]</sup>。此外，在气候变暖的环境中，喜高温的病原体将增加鱼病爆发的可能性，导致鲑鱼死亡率增加，丰富度降低。

## 3 结论与展望

作者通过梳理相关研究进展，从温度变化、淡水和海洋环境的变化以及鱼病传播 4 个方面讨论了对鲑鱼丰富度和繁殖的影响，可为鲑鱼种群相关研究及管理应对气候变化提供一定的理论支持。得出结论：温度变化会影响鲑鱼产卵的时间；夏季水温的升高均会影响鲑鱼向上游迁徙到产卵地和向下

游迁徙入海的数量和时间；夏秋季节溪流和河流流量的改变会影响鲑鱼的迁徙，而冬季冰川融雪的增加会使溪流流量增大，降低幼年鲑鱼的存活率，使得鲑鱼丰富度变小；温度和压力的变化会造成风的变化，从而影响海洋中浮游植物的上涌；二氧化碳浓度的变化使得海洋酸化造成某些浮游动物合成外壳的能力降低；两者都使海洋中鲑鱼的食物供应减少，造成其丰富度降低；水温升高会使病原体增加，鲑鱼死亡率增加。

尽管已经有很多研究将气候变化与鲑鱼的丰富度、生长发育、迁徙过程和生活栖息地等联系起来，但由于其生命周期复杂，不同的影响因子可能在不同的生命阶段差异很大，可关注综合的耦合关系研究；此外，深海中气候变化与鲑鱼的相关作用仍然有待进一步发现。最后，气候变化与人类活动往往密不可分，人类的捕捞、水坝的建设等对鲑鱼整个物种丰富度的影响可能大于气候变化带来的影响，鲑鱼物种应该得到负责任的保护和管理，这将确保为许多国家维持食物供应和经济价值，并且保持鲑鱼在陆地和海洋生态系统中的重要性。

#### 参考文献:

[1] 李思忠. 中国鲑科鱼类地理分布的探讨[J]. 动物学杂志, 1984, 1: 34-37.  
Li Sizhong. A study on the geographical distribution of Salmon in China[J]. Journal of Zoology, 1984, 1: 34-37.

[2] 联合国粮食及农业组织. 2018 年世界渔业和水产养殖状况—实现可持续发展目标[M]. 罗马: 粮农组织渔业部, 2018.  
Food and Agriculture Organization of the United Nations. State of the World Fisheries and Aquaculture in 2018—achieving Sustainable Development goals[M]. Rome: FAO Fisheries Department, 2018.

[3] 张一新, 向洪勇. 跨越生境的资源补贴对生态系统的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 699-711.  
Zhang Yixin, Xiang Hongyong. Research progress on the impacts of resource subsidies across habitats on ecosystems[J]. Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 699-711.

[4] Pete R. Salmon and climate change[EB/OL]. (2009) [20180930]. [https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/species\\_and\\_climate\\_change\\_1.pdf](https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/species_and_climate_change_1.pdf)

[5] Parmesan C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change[J]. Annual Review of Ecology Evolution & Systematics, 2006, 37(1): 637-669.

[6] Pörtner H O, Farrell A P. Ecology. Physiology and cli-

mate change[J]. Science, 2008, 322(5902): 690-692.

[7] Brander K M. Global fish production and climate change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(50): 19709-19714.

[8] Mueter F J, Pyper B J, Peterman R M. Relationships between Coastal Ocean Conditions and Survival Rates of Northeast Pacific Salmon at Multiple Lags[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2005, 134(1): 105-119.

[9] Beamish R, Mahnken C. Taking the next step in fisheries management[C]// Ecosystem Approaches for Fisheries Management, Alaska: Alaska Sea Grant College Program, 1999: 1-21.

[10] Whitney J E, Al-Chokhachy R, Bunnell D B, et al. Physiological basis of climate change impacts on North American Inland Fishes[J]. Fisheries, 2016, 41(7): 332-345.

[11] Armour C L. Guidance for evaluating and recommending temperature regimes to protect fish[M]. Washington: Fish and Wildlife Service, 1991.

[12] Lynch A J, Myers B J E, Chu C, et al. Climate change effects on North American Inland fish populations and assemblages[J]. Fisheries, 2016, 41(7): 346-361.

[13] Isaak D J, Wenger S J, Young M K. Big biology meets microclimatology: defining thermal niches of ectotherms at landscape scales for conservation planning[J]. Ecological Applications, 2017, 27(3): 977-990.

[14] Beamish R J, Mcfarlane G A. Effects of ocean variability on recruitment and an evaluation of parameters used in stock assessment models[J]. Reviews in Fish Biology & Fisheries, 1992, 2(1): 88-89.

[15] Pearcy W G. Ocean ecology of North Pacific salmonids[J]. Books in Recruitment Fishery Oceanography, 1992, 2(1): 41-42.

[16] ISAB (Independent Scientific Advisory Board). Climate change impacts on Columbia River Basin fish and wildlife[M]. Columbia: Northwest Power and Conservation Council, 2007.

[17] Achord S, Zabel R W, Sandford B P. Migration timing, growth, and estimated parr to smolt survival rates of wild Snake river spring-summer chinook salmon from the Salmon River Basin, Idaho, to the Lower Snake River[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2007, 136(1): 142-154.

[18] Hare S R. Climate change and salmon production in the northeast Pacific Ocean[J]. Can Spec Publ Fish Aquat Sci, 1995, 121: 357-372.

[19] Jonsson B, Jonsson N. A review of the likely effects of climate change on anadromous Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*Salmo trutta*), with particular



- reference to water temperature and flow[J]. *Journal of Fish Biology*, 2009, 75(10): 2381-2447.
- [20] 梁雄伟, 于洪贤, 刘伟. 气候变化对鲑鳟鱼类栖息环境及相关生物学的影响[J]. *水产学杂志*, 2011, 24(2): 63-68.  
Liang Xiongwei, Yu Hongxian, Liu Wei. Effects of climate change on the habitat environment and related biology of salmon trout[J]. *Journal of Aquatic Sciences*, 2011, 24 (2): 63-68.
- [21] Crozier L G, Zabel R W, Hamlet A F. Predicting differential effects of climate change at the population level with life-cycle models of spring Chinook salmon[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(2): 236-249.
- [22] Beckman B, Larsen D, BeedaLee-Pawlak, et al. Relation of fish size and growth rate to migration of spring Chinook salmon smolts[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 1998, 18(3): 537-546.
- [23] Elliott J M, Elliott J A. Temperature requirements of Atlantic salmon (*Salmo salar*), brown trout (*Salmo trutta*) and Arctic charr (*Salvelinus alpinus*): Predicting the effects of climate change[J]. *Journal of Fish Biology*, 2010, 77(8): 1793-1817.
- [24] Mote P W, Parson E A, Hamlet A F, et al. Preparing for climatic change: the water, salmon, and forests of the Pacific Northwest[J]. *Climatic Change*, 2003, 61(1-2): 45-88.
- [25] Elliott J M. Tolerance and resistance to thermal stress in juvenile Atlantic salmon(*Salmo salar*)[J]. *Freshwater Biology*, 1991, 25(1): 61-70.
- [26] Jonsson B, Forseth T, Jensen A J, et al. Thermal Performance of Juvenile Atlantic Salmon (*Salmo salar* L.)[J]. *Functional Ecology*, 2001, 15(6): 701-711.
- [27] Banks J L, Fowler L G, Elliott J W. Effects of rearing temperature on growth, body form, and hematology of fall chinook fingerlings[J]. *The Progressive Fish-Culturist*, 1971, 33(33): 20-26.
- [28] Brett J R, Clarke W C, Shelbourn J E. Experiments on thermal requirements for growth and food conversion efficiency of juvenile chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*)[J]. *Canadian Technical Report of Fisheries & Aquatic Sciences*, 1982, 97(6): 1-29.
- [29] Brett J R. Temperature tolerance in young Pacific Salmon genus (*Oncorhynchus*)[J]. *Canadian Journal of Fisheries Research Board*, 1952, 9(6): 265-323.
- [30] Edsall T A, Frank A M, Rottiers D V, et al. The effect of temperature and ration size on the growth, body composition, and energy content of juvenile coho salmon[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 1999, 25(2): 355-362.
- [31] Crozier L. Impacts of climate change on salmon of the Pacific northwest[D]. Washington: National Marine Fisheries Service, NOAA, 2015, 1-35.
- [32] Naughton G P, Caudill C C, Keefer M L, et al. Late-season mortality during migration of radio-tagged adult sockeyes[J]. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 2005, 62(1): 30-47.
- [33] Quinn T P, Adams D J. Environmental changes affecting the migratory timing of American shad and sockeye salmon[J]. *Ecology*, 1996, 77(4): 1151-1162.
- [34] Isaak D J, Luce C H, Horan D L, et al. Global warming of salmon and trout rivers in the northwestern U.S.: Road to ruin or path through purgatory?[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2018.
- [35] Crozier L G, Hendry A P, Lawson P W, et al. Potential responses to climate change in organisms with complex life histories: evolution and plasticity in Pacific salmon[J]. *Evolutionary Applications*, 2008, 1(2): 252-270.
- [36] Beamish R J, Mahnken C. A critical size and period hypothesis to explain natural regulation of salmon abundance and the linkage to climate and climate change[J]. *Progress in Oceanography*, 2001, 49(1): 423-437.
- [37] Honea J M, Mcclure M M, Jorgensen J C, et al. Assessing freshwater life-stage vulnerability of an endangered Chinook salmon population to climate change influences on stream habitat[J]. *Climate Research*, 2016, 71(2).
- [38] Walsh C L, Kilsby C G. Implications of climate change on flow regime affecting Atlantic salmon[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2007, 11(3): 1125-1141.
- [39] Mckenzie D. Restoring salmon habitat for a changing climate[J]. *River Research & Applications*, 2013, 29(8): 939-960.
- [40] Beaugrand G, Reid P C. Long-term changes in phytoplankton, zooplankton and salmon related to climate[J]. *Global Change Biology*, 2010, 9(6): 801-817.
- [41] McCullough D A. A review and synthesis of effects of alterations to the water temperature regime on freshwater life stages of salmonids, with special reference to Chinook salmon[M]. Washington: Environmental Protection Agency, 1999.
- [42] Marcogliese D J. Implications of climate change for parasitism of animals in the aquatic environment[J]. *Canadian Journal of Zoology*, 2001, 79(8): 1331-1352.
- [43] Ordal E J, Pacha R E. Effects of temperature on disease in fish[C]//Proceedings of the twelfth Pacific department of environmental quality. Portland: Standard and Assessment Section, 1963: 39-56.
- [44] Coghlan S, Ringler N. Temperature- dependent effects of rainbow trout on growth of Atlantic salmon parr[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2005, 31(4): 386-396.

# Research progress on the effects of climate change on salmon abundance and reproduction

WANG Zhi-ping<sup>1</sup>, LI Jia-xun<sup>1</sup>, Dave Fillion<sup>2</sup>, HUO Yao-ming<sup>3</sup>, ZHOU Wen-hui<sup>4</sup>

(1. School of Geographical and Oceanographic Science, Nanjing Universities, Nanjing 210046; 2. San Diego Zoo Safari Park, CA, 92027; 3. Institute of Environmental Engineering, Chenggong University, Tainan 701; 4. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200082)

**Received:** Sept., 29, 2018

**Key words:** salmon; climate change; abundance; reproduction

**Abstract:** Salmon is an important food source for humans and has enormous economic value. Salmon resources also play an important role in maintaining the structure, function, and processes of streams and terrestrial ecosystems by transporting nutrients. Salmon is a coldwater fish that is extremely sensitive to temperature, and it exhibits an evident response to climate change. This study explores relevant research through a literature review and discusses the effects of temperature changes due to climate change and the changes in freshwater and marine environments as well as pathogens on the abundance and reproduction of salmon; further, the study presents research prospects. It was found that temperature changes have a substantial impact on salmon spawning and migration. Changes in streamflow and river flows have an influence on the migratory behavior of salmon and the survival of juvenile salmon. Further, changes in temperature and carbon dioxide concentration reduce the supply of marine food and decrease salmon abundance; in particular, an increase in water temperature increases the amount of pathogens, resulting in an increase in salmon mortality. The data obtained in this study can provide theoretical support for further research and management of salmon population to cope with climate change.

(本文编辑: 谭雪静)