

青藏高原东南缘地区高山湖泊沉积硅藻对气候变暖和大气氮沉降的响应

代平慧

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2025年3月13日; 录用日期: 2025年4月19日; 发布日期: 2025年4月29日

摘要

青藏高原东南缘地区的高山湖泊因其独特的地理位置和生态环境, 对全球变化极为敏感。本研究通过综合分析该地区高山湖泊沉积硅藻对气候变暖和大气氮沉降的响应, 探讨了硅藻群落如何在气候变暖和氮沉降的双重压力下发生变化, 并揭示了其生态适应机制。研究表明, 气候变暖和大气氮沉降显著影响了高山湖泊的硅藻群落, 主要表现为耐寒底栖硅藻的减少和耐温浮游硅藻的增加, 以及富营养指示种的扩张。这些变化不仅反映了湖泊生态系统对环境变化的适应机制, 也为理解区域环境变化的历史模式和未来趋势提供了科学依据。未来研究应加强长期监测网络建设、采用跨学科方法、开展区域对比与全球关联研究, 以深化对高山湖泊生态系统响应机制的理解, 并为生态保护提供科学依据。

关键词

青藏高原东南缘, 高山湖泊, 硅藻, 气候变暖, 大气氮沉降

Response of Sedimentary Diatoms from Alpine Lakes in the Southeastern Margin of the Qinghai-Xizang Plateau to Climate Warming and Atmospheric Nitrogen Deposition

Pinghui Dai

Department of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: Mar. 13th, 2025; accepted: Apr. 19th, 2025; published: Apr. 29th, 2025

文章引用: 代平慧. 青藏高原东南缘地区高山湖泊沉积硅藻对气候变暖和大气氮沉降的响应[J]. 地理科学研究, 2025, 14(2): 456-463. DOI: 10.12677/gser.2025.142045

Abstract

Alpine lakes in the southeastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau are extremely sensitive to global changes due to their unique geographical location and ecological environment. In this study, by comprehensively analyzing the response of diatoms deposited in alpine lakes in this region to climate warming and atmospheric nitrogen deposition, we explored how diatom communities changed under the dual pressure of climate warming and nitrogen deposition, and revealed their ecological adaptation mechanisms. The study showed that climate warming and atmospheric nitrogen deposition significantly affected the diatom communities in alpine lakes, which were mainly manifested by the decrease of cold-tolerant benthic diatoms and the increase of temperature-tolerant planktonic diatoms, as well as the expansion of eutrophic indicator species. These changes not only reflect the adaptation mechanism of lake ecosystems to environmental changes, but also provide a scientific basis for understanding the historical patterns and future trends of regional environmental changes. Future research should strengthen the long-term monitoring network, adopt interdisciplinary approaches, and conduct regional comparative and global correlation studies to deepen the understanding of the response mechanisms of alpine lake ecosystems and provide a scientific basis for ecological conservation.

Keywords

Southeast Margin of the Qinghai-Xizang Plateau, Alpine Lakes, Diatoms, Climate Warming, Atmospheric Nitrogen Deposition

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高山湖泊因其独特的地理位置和相对较少的人类干扰,被认为是研究全球环境变化的理想天然场所[1][2]。青藏高原东南缘地区包括滇西北、川西以及青藏高原东南部分布着众多高山湖泊,这些高山湖泊面积小、水深小、食物网结构单一[3],使得它们对环境变化极为敏感,能够迅速响应温度升高和大气营养物质输入的变化,成为研究环境变化的热点区域。高山湖泊的沉积物因其连续性好、沉积速率低的特点,不仅为解析区域环境演变提供了独特的时间序列信息,而且其中的沉积硅藻化石记录由于其连续性和高分辨率的特性,成为重建古环境、揭示生态系统对全球变化响应机制的重要生物指标[4]。

青藏高原东南缘地区正经历显著的气候变暖和不断增强的大气氮沉降压力[5][6]。然而,当前该地区高山湖泊对于硅藻群落如何协同响应这两种驱动力的研究仍存在不足。本综述聚焦青藏高原东南缘地区高山湖泊沉积硅藻对气候变暖和大气氮沉降的响应,旨在揭示湖泊生态系统对全球变化的适应机制。通过分析硅藻群落对温度升高和氮素增加的反应,可以深入理解高山湖泊生态系统的动态变化过程及其驱动因素。这不仅有助于阐明区域环境变化的历史模式,还为青藏高原东南缘地区的生态保护和气候变化研究提供了科学依据。

2. 理论背景

2.1. 硅藻生态学与古湖沼学

硅藻(Diatoms)是湖泊生态系统中的关键初级生产者,因其对环境因子(温度、营养盐浓度、pH、光

照)的高度敏感性以及不易分解的硅质细胞壁,成为重建湖泊历史环境变化的重要代用指标[7]。沉积硅藻化石通过群落结构的变化,记录了过去数十年至数百年的湖泊生态信息,为研究长期环境演变提供了可靠的生物学依据。例如,硅藻化石的种类、丰度和形态特征能够反映湖泊水体的物理、化学和生物学条件的变化[8]。全球范围内,硅藻已被广泛应用于湖泊环境的重建,尤其在偏远地区的高山湖泊中。

2.2. 气候变暖的影响机制

气候变暖通过改变湖泊的物理特性(如水温、冰封期长度、热力分层)和化学特性(如营养循环)显著影响硅藻群落的结构和功能。温度升高会缩短湖泊的冰封期、增强热力分层结构并改变水温和光照条件,从而延长硅藻的生长期并改变种间竞争格局[9]。例如,在区域增温的条件下,耐寒硅藻(*Aulacoseira* 属)的丰度可能减少,而耐温浮游硅藻(*Cyclotella* 属)的比例增加[10]。此外,气候变暖还可能通过改变湖泊的水体混合模式和营养循环,间接影响硅藻的生长和分布[11]。例如,分层稳定性增强可能抑制垂直混合,减少深层营养盐上涌,导致浮游硅藻群落小型化[12]。青藏高原东南缘地区的高山湖泊对气候变暖尤为敏感,因其冰封期和温度变化直接影响硅藻的生态动态。

2.3. 大气氮沉降的作用

大气氮沉降作为一种外源营养输入,能够显著改变湖泊的氮磷比和营养状态,进而影响硅藻的生长和群落组成。在贫营养的高山湖泊中,外源氮输入可能改变原有氮限制状态,促进某些对氮素需求较高的硅藻种(*Fragilari* 属和 *Asterionella* 属)的增多[13]。此外,氮沉降可能间接加剧磷限制,抑制需磷量高的硅藻类群(*Fragilaria crotonensis*) [14]。研究表明,大气氮沉降的增加与湖泊中硅藻群落结构的改变密切相关,尤其是在人类活动影响较大的地区[15]。尽管青藏高原东南缘地区的人类活动较少,但长距离传输的大气氮沉降仍可能对这些偏远湖泊产生显著影响。大气氮沉降还可能通过改变湖泊的营养盐限制模式,影响硅藻的生物量和多样性[14]。

2.4. 协同效应的理论基础

气候变暖与大气氮沉降可能通过交互作用共同影响高山湖泊生态系统,产生协同效应。例如,温度升高通过增强硝化作用提高氮的生物利用率,从而进一步加剧氮沉降的富营养化效应,影响硅藻群落结构[16]。升温导致的热力分层加剧与氮输入共同促进浮游硅藻优势种更替,例如温带湖泊中 *Cyclotella* 取代 *Aulacoseira* 的趋势[9]。在高山湖泊中,冰川融化带来的氮输入与气候变暖的协同作用,可能进一步改变湖泊的营养状态和硅藻群落结构[12]。此外,气候变暖和氮沉降的共同作用还可能通过改变湖泊的水文循环和生物地球化学过程,影响硅藻的生态位和竞争优势[17]。

3. 研究现状

3.1. 气候变暖对硅藻群落的影响

气候变暖是影响青藏高原东南缘高山湖泊硅藻群落变化的关键因子。研究表明,近几十年来,区域温度显著上升,改变了湖泊的物理和化学环境,直接或间接影响硅藻的群落结构、多样性及优势种分布。气候变暖通过升高湖泊水温、缩短冰封期和增强热力分层,显著改变了高山湖泊的物理环境,从而为硅藻生长提供了新的条件。Wischniewski 等的研究指出,青藏高原东南部高山湖泊冰封期缩短延长了硅藻的生长季,增加了光照和营养盐的获取时间[18]。Rühland 等在全球范围内研究综述发现,湖泊变暖导致热力分层增强,改变了硅藻的垂直分布,尤其在深水湖泊中表现明显。在滇西北的高山湖泊中发现,气候

变暖引发硅藻群落结构的显著变化,主要表现为耐寒硅藻减少和耐温浮游硅藻比例增加[9]。例如,泸沽湖沉积记录显示耐寒硅藻(*Aulacoseira granulata*)的丰度显著下降,而耐温浮游硅藻(*Cyclotella ocellata*)比例上升,这一趋势与20世纪以来区域平均气温上升约1℃~2℃一致[19],反映了湖泊水温升高和冰封期缩短对硅藻生态位的直接影响。Chen等在泸沽湖的研究中也指出,晚冰期以来硅藻群落对温度升高敏感,尤其在季风活动增强的背景下,浮游硅藻比例显著增加[20]。青藏高原东南部Cuomujiri湖硅藻记录显示了从底栖种向浮游种的转变,自2004年以来,*Lindavia ocellata*明显增加。尽管过去几十年来青藏高原东南部的气候大幅变暖,但直到过去14年经历了显著的高温,Cuomujiri湖的硅藻组合才表现出显著的反应[21]。Winder等的研究进一步揭示,湖泊变暖有利于小型浮游硅藻增殖,因其在温暖水体中具有更高的生长速率和竞争优势[22]。例如,青藏高原东南缘巴松措过去一千年的硅藻记录显示以浮游物种为主,组成变化主要以大细胞和小细胞*Pantocsekiella ocellata*之间以及浮游和底栖硅藻物种之间的交替为特征。硅藻组合显示,自17世纪末以来,大个体*P. ocellata*减少,小个体*P. ocellata*增加,反映了温度有利于小个体的浮游物种[23]。

3.2. 大气氮沉降对硅藻群落的影响

根据沉积硅藻记录的研究,近40年来外源氮输入通过改变湖泊氮磷比(N:P)、驱动营养状态转变,显著影响了硅藻群落结构、功能群组成及多样性。对青藏高原东南部两个高山湖泊(Shade Co和Moon Lake)的沉积记录进行了多指标分析,发现自19世纪末至20世纪初以来,湖泊初级生产力显著增加。通过对硅藻和沉积色素数据的主成分分析(PCA),研究显示硅藻群落结构在小冰期后发生了显著变化。Shade Co湖泊具有较大的流域面积和较密的灌木植被,而Moon Lake流域较小,植被覆盖较稀疏,但两湖均表现出生产力增加的趋势,表明大气氮沉降作为外源营养盐的输入,促进了硅藻的生长,尤其是富营养指示种的丰度增加(如*Asterionella formosa*或*Fragilaria crotonensis*等),尽管具体物种变化需进一步验证[24]。

酸沉降也显著影响硅藻群落结构,尤其是嗜酸性硅藻的增加。例如,Kang等对滇西北老君山浅水高山湖泊太极湖的长期生态变化,发现硅藻群落变化与大气酸沉降和气候变暖密切相关[25]。研究通过多指标分析(包括硅藻、化学元素等)发现,酸沉降导致湖泊水体总有机碳(TOC)下降,并显著影响硅藻群落结构。具体表现为嗜酸性硅藻(如Eunotia属或*Tabellaria flocculosa*)的相对丰度增加[25]。这表明,在某些流域为酸性基岩的湖泊中,氮沉降加快基岩酸化,水体pH值下降,进而导致适应低pH环境的硅藻种类增多。大气氮沉降会导致硅藻群落生产力增加,但物种组成保持相对稳定,以*Cyclotella ocellata*为主。Zhang等对滇西北香格里拉市的错恰湖的沉积色素和沉积硅藻研究推断出近期的生态变化。研究表明,自20世纪中期以来,湖泊初级生产力增加,硅藻群落发生了调整[26],虽然具体物种变化未详细列出,但研究指出这些变化可能与大气氮沉降和气候变暖的协同作用有关。氮沉降作为营养盐输入,可能促进了硅藻的生长,而气候变暖可能进一步改变了群落结构,例如通过延长生长季节或改变水温条件[26]。

综上所述,大气氮沉降对青藏高原东南缘地区高山湖泊硅藻群落的影响表现出多样性,其具体响应取决于氮沉降的形式(营养盐或酸沉降)以及湖泊的环境背景。研究发现,浅层湖泊更容易受到酸化的影响,而深水湖泊则更容易受到营养富集效应的驱动。氮沉降与气候变暖的协同作用对硅藻群落的生产力和结构产生了深远影响。然而,尽管已有研究取得了一定进展,仍存在一些不足之处:首先,研究所涉及的湖泊数量有限,难以全面代表青藏高原东南缘地区的多样性;其次,对具体硅藻物种变化的报道较少,很多研究仅停留在群落结构或功能群的描述层面;最后,氮沉降的长期动态数据较为缺乏,这限制了对历史变化的重建和未来趋势的预测。虽然目前的研究为理解氮沉降对高山湖泊生态系统的驱动机制提供了重要的基础,但仍需进一步完善相关研究,以便更好地揭示硅藻群落对气候变暖和氮沉降的响应特征。

4. 研究的挑战与展望

青藏高原东南缘地区高山湖泊沉积硅藻对气候变暖和大气氮沉降的响应研究近年来取得了显著进展,但仍面临诸多挑战,包括数据局限性、多因子耦合复杂性和空间异质性等。此外,未来研究方向需聚焦于长期监测网络建设、跨学科方法、区域对比与全球关联以及管理应用,以深化对高山湖泊生态系统响应机制的理解,并为生态保护提供科学依据。

4.1. 当前挑战

4.1.1. 数据局限性

在青藏高原东南缘地区高山湖泊的研究中,数据局限性是一个核心问题。首先,现有的历史气候数据的时空分辨率较低,导致对长期气候变化趋势的精确重建存在困难。多数沉积硅藻研究依赖较低分辨率的代用指标(如每 5~10 年一个样品),难以捕捉短期气候波动对硅藻群落的影响[27]。例如,青藏高原东南缘湖泊的冰芯记录显示,近 50 年升温速率为 $0.3^{\circ}\text{C}\sim 0.5^{\circ}\text{C}/10$ 年,但同期硅藻沉积记录的时间分辨率仅为 5 年,导致温度-群落动态的滞后效应难以量化。此外,大气氮沉降的历史数据也较为稀缺,正如 Hu 等指出,长期的氮沉降动态数据不足,导致研究者难以深入理解湖泊生态系统对氮输入的响应机制[24]。这种数据缺陷不仅限制了环境-生态响应模型的构建,也降低了研究结果的准确性和普适性。尤其在西南高山湖泊这样偏远且观测条件有限的地区,数据的稀疏性尤为突出。

4.1.2. 多因子耦合复杂性

高山湖泊生态系统受多种环境因子的共同作用,包括温度、大气氮沉降、UV 辐射和冰川融水输入等,这些因子的交互效应显著增加了研究的复杂性。实验研究表明,升温可能增强氮沉降对硅藻群落的促进效应(*Cyclotella* 增多),但在磷限制条件下,两者可能呈现拮抗关系[11]。例如,温度升高可能提升氮的生物利用率,从而放大氮沉降的生态效应[16]。此外,高海拔地区强烈的 UV 辐射进一步复杂化了硅藻的响应机制。冰川退缩导致融水输入增加,可能稀释氮沉降效应并改变水体浊度,进而影响硅藻的光合作用[28]。然而,当前研究多集中于单一或少数因子的效应,缺乏对多因子耦合影响的系统性分析,导致对硅藻群落变化驱动机制的理解存在一定偏差。

4.1.3. 空间异质性

不同湖泊的流域地形、植被覆盖、冰川融水输入等特征差异显著,导致硅藻群落对气候变暖和氮沉降的响应呈现区域性差异。例如, Hu (2014) 等对比研究 Shade Co 和 Moon Lake 发现,尽管两湖均受大气氮沉降影响,但由于流域面积和植被覆盖的差异,其生态响应模式并不一致。Shade Co 因较大流域和较密灌木植被,对氮沉降的响应更显著,而 Moon Lake 的响应则较温和[24]。植被覆盖度高的流域通过土壤固氮缓冲外源输入,而裸露岩石区湖泊的响应更为直接[29]。

4.2. 未来研究方向

4.2.1. 长期监测网络建设

为克服数据局限性,未来研究应优先建设长期监测网络,整合现代观测数据与古湖沼学记录,构建多时间尺度的环境-生态响应模型。Smol 等强调,长期监测是理解高山湖泊对全球变化响应的重要手段[30],尤其在偏远地区如青藏高原东南缘,因地理位置偏僻,监测站点稀少,建立覆盖不同海拔和流域特征的监测网络尤为迫切。通过结合沉积记录、遥感数据和现场观测,可以显著提高气候和氮沉降数据的时空分辨率,为硅藻群落变化的驱动机制提供可靠背景数据。此外, Rühland 等建议采用多指标方法(如硅藻、沉积色素、稳定同位素)进行综合分析,以全面解析湖泊生态系统的动态响应[9]。

4.2.2. 跨学科方法

为应对多因子耦合的复杂性,未来研究应采用跨学科方法,结合基因组学和稳定同位素技术,深入探索硅藻功能群对环境压力的分子响应机制。Battarbee 等指出,将硅藻生态学研究与分子生物学结合,可以揭示其对环境变化的适应策略[8]。例如,通过分析硅藻的基因表达模式,可了解其在氮沉降和温度升高条件下的代谢调整,从而阐明群落结构变化的内在机制。此外,稳定同位素技术(如 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$)可用于追踪氮源和碳循环变化,帮助区分氮沉降与气候变化的相对贡献[13]。这些跨学科手段将突破传统研究的局限,提升对硅藻响应机制的理解深度。

4.2.3. 区域对比与全球关联

为解决空间异质性问题,未来研究应加强区域对比,将青藏高原东南缘高山湖泊与全球其他类似系统(如北极、安第斯山)进行比较,提高普适性规律。Catalan 等在全球高山湖泊的古湖沼学研究中指出,不同区域湖泊对气候变化的响应既有共性,也受区域特征影响[17]。通过跨区域对比,可识别硅藻群落变化的普遍模式与区域特异性。例如,Rühland 等发现,全球高山湖泊硅藻群落对变暖的响应普遍表现为浮游硅藻比例增加,但具体物种和变化幅度因地而异[9]。在青藏高原东南缘,冰川融水和季风活动等区域特征可能塑造独特的硅藻响应模式,通过与全球其他地区的对比,可揭示其独特性与共性。

5. 结论

5.1. 主要发现

青藏高原东南缘地区高山湖泊沉积硅藻对气候变暖和大气氮沉降表现出显著的生态响应,反映了湖泊生态系统对全球变化的高度敏感性。研究表明,气候变暖通过改变湖泊物理环境,如水温升高和冰期缩短,驱动硅藻群落结构重组。耐寒底栖硅藻比例减少,而浮游硅藻优势种显著扩张。同时,大气氮沉降作为外源营养输入,促进富营养种增殖,进而影响硅藻多样性。两者的协同作用加剧了群落演替,尤其在温暖期,氮沉降对硅藻群落的调控效应更为明显[16]。这些变化不仅揭示了硅藻对环境压力的适应机制,也为理解湖泊生态系统在全球变化背景下的动态提供了关键证据。

5.2. 研究方向

未来研究应填补数据和方法上的空白,深化对多重环境因子交互作用的理解,并探索硅藻群落对未来气候情景的潜在响应。首先,建立长期监测网络,结合现代观测与古湖沼学记录,提高气候和氮沉降数据的时空分辨率。其次,引入跨学科技术,如基因组学和稳定同位素分析,解析硅藻功能群的响应机制。此外,开展区域对比研究,探寻普适性规律并预测生态阈值。最后,基于硅藻响应的研究成果,为高山湖泊生态保护和气候适应策略提供科学依据。这些研究不仅将深化对高山湖泊生态过程的理解,也为全球变化背景高山地区脆弱生态系统的可持续管理提供科学依据。

参考文献

- [1] Battarbee, R.W., Grytnes, J., Thompson, R., Appleby, P.G., Catalan, J., Korhola, A., *et al.* (2002) Comparing Palaeolimnological and Instrumental Evidence of Climate Change for Remote Mountain Lakes over the Last 200 Years. *Journal of Paleolimnology*, **28**, 161-179. <https://doi.org/10.1023/a:1020384204940>
- [2] Moser, K.A., Baron, J.S., Brahney, J., Oleksy, I.A., Saros, J.E., Hunday, E.J., *et al.* (2019) Mountain Lakes: Eyes on Global Environmental Change. *Global and Planetary Change*, **178**, 77-95. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.04.001>
- [3] Nevalainen, L. and Luoto, T.P. (2012) Faunal (Chironomidae, Cladocera) Responses to Post-Little Ice Age Climate Warming in the High Austrian Alps. *Journal of Paleolimnology*, **48**, 711-724. <https://doi.org/10.1007/s10933-012-9640-3>

- [4] Smol, J.P., Wolfe, A.P., Birks, H.J.B., Douglas, M.S.V., Jones, V.J., Korhola, A., *et al.* (2005) Climate-Driven Regime Shifts in the Biological Communities of Arctic Lakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **102**, 4397-4402. <https://doi.org/10.1073/pnas.0500245102>
- [5] Immerzeel, W.W., Lutz, A.F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., *et al.* (2019) Importance and Vulnerability of the World's Water Towers. *Nature*, **577**, 364-369. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>
- [6] Giambastiani, B.M.S. (2007) Evoluzione Idrologica ed Idrogeologica Della Pineta di San Vitale (Ravenna). Ph.D. Thesis, Bologna University.
- [7] Zhang, Y., Song, L., Liu, X.J., Li, W.Q., Lü, S.H., Zheng, L.X., *et al.* (2012) Atmospheric Organic Nitrogen Deposition in China. *Atmospheric Environment*, **46**, 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.09.080>
- [8] Battarbee, R.W. (2000) Palaeolimnological Approaches to Climate Change, with Special Regard to the Biological Record. *Quaternary Science Reviews*, **19**, 107-124. [https://doi.org/10.1016/s0277-3791\(99\)00057-8](https://doi.org/10.1016/s0277-3791(99)00057-8)
- [9] Rühland, K.M., Paterson, A.M. and Smol, J.P. (2015) Lake Diatom Responses to Warming: Reviewing the Evidence. *Journal of Paleolimnology*, **54**, 1-35. <https://doi.org/10.1007/s10933-015-9837-3>
- [10] Winder, M. and Sommer, U. (2012) Phytoplankton Response to a Changing Climate. *Hydrobiologia*, **698**, 5-16. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1149-2>
- [11] Saros, J.E., Stone, J.R., Pederson, G.T., Slemmons, K.E.H., Spanbauer, T., Schliep, A., *et al.* (2012) Climate-Induced Changes in Lake Ecosystem Structure Inferred from Coupled Neo- and Paleoecological Approaches. *Ecology*, **93**, 2155-2164. <https://doi.org/10.1890/11-2218.1>
- [12] Saros, J.E., Clow, D.W., Blett, T. and Wolfe, A.P. (2010) Critical Nitrogen Deposition Loads in High-Elevation Lakes of the Western US Inferred from Paleolimnological Records. *Water, Air, & Soil Pollution*, **216**, 193-202. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0526-6>
- [13] Wolfe, A.P., Baron, J.S. and Cornett, R.J. (2001) Anthropogenic Nitrogen Deposition Induces Rapid Ecological Changes in Alpine Lakes of the Colorado Front Range (USA). *Journal of Paleolimnology*, **25**, 1-7. <https://doi.org/10.1023/a:1008129509322>
- [14] Elser, J.J., Kyle, M., Steger, L., Nydick, K.R. and Baron, J.S. (2009) Nutrient Availability and Phytoplankton Nutrient Limitation across a Gradient of Atmospheric Nitrogen Deposition. *Ecology*, **90**, 3062-3073. <https://doi.org/10.1890/08-1742.1>
- [15] Bergström, A. and Jansson, M. (2006) Atmospheric Nitrogen Deposition Has Caused Nitrogen Enrichment and Eutrophication of Lakes in the Northern Hemisphere. *Global Change Biology*, **12**, 635-643. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01129.x>
- [16] Hobbs, W.O., Lafrancois, B.M., Stottlemeyer, R., Toczydlowski, D., Engstrom, D.R., Edlund, M.B., *et al.* (2016) Nitrogen Deposition to Lakes in National Parks of the Western Great Lakes Region: Isotopic Signatures, Watershed Retention, and Algal Shifts. *Global Biogeochemical Cycles*, **30**, 514-533. <https://doi.org/10.1002/2015gb005228>
- [17] Catalan, J., Pla-Rabés, S., Wolfe, A.P., Smol, J.P., Rühland, K.M., Anderson, N.J., *et al.* (2013) Global Change Revealed by Palaeolimnological Records from Remote Lakes: A Review. *Journal of Paleolimnology*, **49**, 513-535. <https://doi.org/10.1007/s10933-013-9681-2>
- [18] Wischniewski, J., Mackay, A.W., Appleby, P.G., Mischke, S. and Herzsuh, U. (2011) Modest Diatom Responses to Regional Warming on the Southeast Tibetan Plateau during the Last Two Centuries. *Journal of Paleolimnology*, **46**, 215-227. <https://doi.org/10.1007/s10933-011-9533-x>
- [19] Wang, Q., Yang, X., Anderson, N.J. and Ji, J. (2015) Diatom Seasonality and Sedimentation in a Subtropical Alpine Lake (Lugu Hu, Yunnan-Sichuan, Southwest China). *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **47**, 461-472. <https://doi.org/10.1657/aaar0014-039>
- [20] Chen, G., Selbie, D.T., Griffiths, K., Sweetman, J.N., Botrel, M., Taranu, Z.E., *et al.* (2014) Proximity to Ice Fields and Lake Depth as Modulators of Paleoclimate Records: A Regional Study from Southwest Yukon, Canada. *Journal of Paleolimnology*, **52**, 185-200. <https://doi.org/10.1007/s10933-014-9787-1>
- [21] He, J., Liu, J., Rühland, K.M., Zhang, J., Chen, Z., Dong, H., *et al.* (2022) Responses of Lake Diatoms to Rapid 21st Century Warming on the Southeastern Tibetan Plateau. *Anthropocene*, **39**, Article 100345. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2022.100345>
- [22] Winder, M., Reuter, J.E. and Schladow, S.G. (2008) Lake Warming Favours Small-Sized Planktonic Diatom Species. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **276**, 427-435. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.1200>
- [23] Liao, M., Herzsuh, U., Wang, Y., Liu, X., Ni, J. and Li, K. (2020) Lake Diatom Response to Climate Change and Sedimentary Events on the Southeastern Tibetan Plateau during the Last Millennium. *Quaternary Science Reviews*, **241**, Article 106409. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106409>
- [24] Hu, Z., Anderson, N.J., Yang, X. and McGowan, S. (2014) Catchment-Mediated Atmospheric Nitrogen Deposition

- Drives Ecological Change in Two Alpine Lakes in SE Tibet. *Global Change Biology*, **20**, 1614-1628. <https://doi.org/10.1111/gcb.12435>
- [25] Kang, W., Chen, G., Wang, J., Huang, L., Wang, L., Li, R., *et al.* (2019) Assessing the Impact of Long-Term Changes in Climate and Atmospheric Deposition on a Shallow Alpine Lake from Southeast Tibet. *Science of The Total Environment*, **650**, 713-724. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.066>
- [26] Zhang, C., Kong, X., Xue, B., Zhao, C., Yang, X., Cheng, L., *et al.* (2023) Synergistic Effects of Climate Warming and Atmospheric Nutrient Deposition on the Alpine Lake Ecosystem in the South-Eastern Tibetan Plateau during the Anthropocene. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **11**, Article 1119840. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1119840>
- [27] Kaufman, D.S., Schneider, D.P., McKay, N.P., Ammann, C.M., Bradley, R.S., Briffa, K.R., *et al.* (2009) Recent Warming Reverses Long-Term Arctic Cooling. *Science*, **325**, 1236-1239. <https://doi.org/10.1126/science.1173983>
- [28] Thompson, R., Kamenik, C. and Schmidt, R. (2005) Ultra-Sensitive Alpine Lakes and Climate Change. *Journal of Limnology*, **64**, 139-152. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2005.139>
- [29] Holtgrieve, G.W., Schindler, D.E., Hobbs, W.O., Leavitt, P.R., Ward, E.J., Bunting, L., *et al.* (2011) A Coherent Signature of Anthropogenic Nitrogen Deposition to Remote Watersheds of the Northern Hemisphere. *Science*, **334**, 1545-1548. <https://doi.org/10.1126/science.1212267>
- [30] Smol, J.P. and Douglas, M.S. (2007) From Controversy to Consensus: Making the Case for Recent Climate Change in the Arctic Using Lake Sediments. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **5**, 466-474. <https://doi.org/10.1890/060162>