

东北典型盐碱湿地碳排放的水深临界阈值及其温度依赖性^{*}

李姝臻^{1,2}, 刘强^{1,2**}, 甘罗扬^{1,2}, 武海涛³, 王波⁴

(1: 北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

(2: 北京师范大学环境学院, 教育部水沙科学重点实验室, 北京 100875)

(3: 中国科学院长春分院, 长春 130022)

(4: 吉林莫莫格国家级自然保护区, 白城 137316)

摘要: 作为全球重要的碳库, 湿地在缓解气候变化方面发挥了重要作用。然而在全球变暖背景下, 湿地的碳排放(尤其是甲烷(CH_4)排放)存在高度变异性和不确定性, 极大地削弱了湿地碳库功能的发挥。为了探究不同水深梯度下东北盐碱湿地碳排放通量的特征, 本研究以莫莫格湿地为主要研究区, 选取 5 种代表性植被(芦苇(*Phragmites australis*)、扁秆藨草(*Bolboschoenus planiculmis*)、三江藨草(*Schoenoplectus nipponicus*)、香蒲(*Typha orientalis* C. Presl)和碱蓬(*Suaeda glauca*)), 布设 Marsh Organ 中型实验生态系统模拟不同水深生境, 揭示 CH_4 和二氧化碳(CO_2)排放通量变化及其环境影响因子。结果表明, 莫莫格湿地 10~50 cm 水深范围内 5 种代表性植被生长季 CH_4 排放通量范围为 0.07~86.74 mg/(m²·h), 平均值为 8.89 mg/(m²·h), 其主要环境影响因素为水深、气温和表层 10 cm 土壤含水量; 在研究水深范围内, 代表性植被生长季 CO_2 排放通量范围为 10.59~1891.08 mg/(m²·h), 平均值为 450.12 mg/(m²·h), 其主要环境影响因素为水深、气温和表层 10 cm 土壤含水量。不同植被对碳排放的贡献量有所差异, 具体来说, 芦苇和香蒲的 CH_4 排放通量最高, 而藨草的 CO_2 排放通量最高。碳排放随水深变化呈现分段规律, CH_4 排放随水深变化呈现先增加后减少的趋势, 而 CO_2 则呈现相反规律, 随水深变化先减小后增加, 其水深临界阈值均出现在 22 cm 处。在不同水深范围内, CO_2 排放对于水深的敏感性均大于 CH_4 , 且当水深大于 22 cm 时, CH_4 和 CO_2 均呈现出更高的水深敏感性。碳排放对不同水深对温度的敏感程度不同, 当水深小于 22 cm 时, CH_4 和 CO_2 均呈现出更高的温度敏感性, 然而当水深大于 22 cm 时, 二者对温度均不敏感。结果表明升温背景下, 东北典型盐碱湿地水陆过渡区关键生态系统在不同水深范围内呈现出不对称的响应模式, 频繁的水位波动会极大地改变湿地碳排放格局, 从而影响到湿地碳功能的稳定发挥。

关键词: 碳排放; 水深; 温度依赖性; 莫莫格湿地; 阈值

Water depth threshold for carbon emissions and its temperature dependence in a typical saline-alkali wetland in Northeast China^{*}

Li Shuzhen^{1,2}, Liu Qiang^{1,2**}, Gan Luoyang^{1,2}, Wu Haitao³ & Wang Bo⁴

(1: State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China)

(2: Key Laboratory for Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China)

(3: Changchun Branch, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, P.R.China)

(4: Momoge National Nature Reserve of Jilin Province, Baicheng 137316, P.R.China)

Abstract: As an important carbon pool around the world, wetlands play an important ecological carbon sink function in mitigating climate change. However, in the context of climate warming, carbon emissions (especially CH_4 emissions) are highly variable and uncertain. In order to explore the characteristics of carbon emission fluxes in Northeast saline-alkali wetlands under different water

* 2024-03-12 收稿; 2024-04-26 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2022YFF1300902)和国家自然科学基金项目(42071129)联合资助。

** 通信作者; E-mail: qiang.liu@bnu.edu.cn。

depth gradients, this study took the Momog Wetland as the study area. Five typical vegetation types (*Phragmites australis*, *Bolboschoenus planiculmis*, *Schoenoplectus nipponicus*, *Typha orientalis* C. Presl and *Suaeda glauca*) were selected to simulate habitats with different water depths through the Marsh Organ medium scale experimental ecosystem to reveal the changes of CH₄ and CO₂ emission fluxes and their environmental impact factors. The results showed that in water depth of -10 to 50 cm, the CH₄ emission fluxes of five selected vegetation species in the growing season ranged from 0.07 to 86.74 mg/(m²·h), with an average value of 8.89 mg/(m²·h). The main driving factors were water depth, air temperature and surface 10-cm soil moisture. In the water depth range of the study, the CO₂ emission flux of the vegetation growing season ranged from 10.59 to 1891.08 mg/(m²·h), and the average CO₂ emission flux was 450.12 mg/(m²·h). The main influencing factors were water depth, air temperature and surface 10-cm soil water content. Diverse vegetation had different contribution on carbon emission. Reed and cattails had the highest CH₄ emission, while *Scirpus* had the highest CO₂ emission. The carbon emission presented a segmented pattern with the water depth change. The CH₄ emission showed a trend of first increasing and then decreasing with the water depth change, while the CO₂ emission showed an opposite pattern, i.e., first decreasing and then increasing with the water depth change. The critical threshold of the water depth was 22 cm. In various water depth ranges, the sensitivity of CO₂ emissions to water depth was greater than that of CH₄. In case of the water depth >22 cm, both CH₄ and CO₂ show higher water depth sensitivity. When the water level was less than 22 cm, both CH₄ and CO₂ show higher temperature sensitivity. However, when the water level was greater than 22 cm, both of them were not sensitive to temperature. The results showed that under the background of warming, the key ecosystems in the water-land transition zone of typical saline-alkali wetlands in Northeast China typically show asymmetric response patterns in different water depth ranges, and frequent water level fluctuations will greatly change the wetland carbon emission pattern, thus affecting the stable play of wetland carbon function.

Keywords: Carbon emissions; water depth; temperature dependent; Momog Wetlands; threshold value

湿地长久以来作为重要的碳库,储存了全球超过1/3的陆地土壤有机碳^[1],在缓解气候变暖方面发挥了重大作用。然而,由于丰富的土壤碳源和水饱和条件形成的厌氧环境,促使湿地成为全球CH₄最大的单一排放来源^[2-3]。IPCC第六次报告指出,湿地碳源和汇之间的分配以及自然碳排放预测仍然是一个挑战^[4],这使得湿地的碳库定位被重新审视。有研究表明,当全球平均温度在百年内升高1.5~2.0℃时,湿地的全球变暖潜能值将升高57%^[5],这意味着湿地温室气体排放对全球变暖的互馈作用存在很大的不确定性。pH大于7.5的湿地被定义为碱性湿地^[6],研究表明产氢/产酸和乙酸发酵产甲烷途径是东北盐碱湿地CH₄的主要产生途径,该过程具有较强的抵抗干旱能力。因此,与滨海盐沼湿地不同,东北碱性湿地是CH₄排放的热点^[6]。综上,厘清碳排放对温度的互馈作用,更好地发挥内陆盐碱湿地碳功能,减少湿地碳排放,对于有效应对气候变化有重要帮助。

水文条件作为湿地生态系统结构和功能的主控因子,在湿地生态系统演替和功能的发挥中占有重要地位^[7],其中水深对湿地碳库功能的影响已经在学术界引发广泛讨论。研究方向从最初简单的水深—碳排放对应关系^[8],逐渐延伸到更为复杂的水文状况。例如Yuan等聚焦水深波动状态下碳排放特征进行了系列研究,并据此确定湿地恢复的适宜水深^[9-10]。基于大数据的研究结果也突破了以往的研究局限,例如,Yao等通过Meta分析汇集了不同类型的湿地碳排放数据,并对以水深为主导的环境因子进行了系统分析^[11]。学者们进一步针对水文过程对碳排放的驱动机制进行深入研究,厘清了其响应阈值,例如,Calabrese等利用全球通量塔数据确定了湿地CH₄排放的临界淹没值^[3]。气候变化背景下,湿地碳排放的不稳定性增加,有待于厘清影响碳排放的关键水热驱动机制。Chen等发现水深增加显著促进了CH₄对温度的响应,而不影响CO₂的温度敏感性^[12]。深入了解湿地水文条件与碳排放的关系,确定水深阈值及其对温度的响应,是目前湿地碳排放研究的热点。

东北地区是中国湿地面积最大的地区,其面积达到 $1.06 \times 10^7 \text{ km}^2$,超过中国湿地总面积的1/4^[13-14]。近60年来,受气候变化和人类活动干扰,以三江平原和松嫩平原为代表的东北湿地因水资源短缺造成的湿地面积萎缩和破碎化问题极其严重,湿地功能严重退化^[13]。针对上述问题政府相关部门进行了一系列补水活动,恢复湿地生态,保障湿地生态系统用水。但是,频繁的水位波动使得东北湿地的碳库功能受到极大的扰动^[15-16]。在双碳战略目标下,有效发挥湿地碳库功能,充分体现湿地的生态服务价值至关重要。然而

现有研究多针对淡水湿地^[15,17-20],对内陆碱性湿地温室气体排放鲜有关注^[21-23]。因此,本研究以东北典型盐沼湿地莫莫格地区水陆过渡区作为主要研究对象,重点探究其在不同水深下的碳排放特征。本研究选取有利于恢复莫莫格湿地生态功能及白鹤迁徙相关食源的5种典型植被,通过Marsh Organ设置不同湿地水深情景,探究水陆过渡区关键生态系统典型碳排放现状及其水深阈值。本研究响应国家碳中和战略目标,服务于湿地碳库的培育和养护,为推进生态文明、建设美丽中国提供内陆盐碱湿地基础数据支撑和减排理论依据;同时为落实《湿地公约》第十四次缔约方大会的《武汉宣言》中湿地保护、修复与合理利用,提供新的实践案例。

1 数据处理与方法

1.1 研究区概况

莫莫格国家级自然保护区(简称莫莫格湿地)行政区划属于吉林省白城市镇赉县,位于松嫩平原西部,是嫩江与洮儿河交界地带。莫莫格湿地2013年正式被国际湿地公约组织列入国际重要湿地名录;同时其作为候鸟重要栖息地,于2023年11月30日入选我国《陆生野生动物重要栖息地名录(第一批)》。莫莫格湿地作为我国内陆典型的盐碱湿地,受农田退水和上游泄洪影响,水位季节性波动显著^[24]。近几十年来,由于长期干旱和缺水导致湿地退化严重^[25],政府部门于2002年开始进行“引嫩入莫”工程,已成功引水超过1000多万m³^[26];2010年起,从白沙滩泵站向莫莫格湿地补水超过1亿m³,对湿地进行错峰补水;2020年启动“吉林西部河湖连通”工程解决湿地缺水问题,每年引水量达到 $3\times10^7\sim5\times10^7\text{ m}^3$ 。人为补水使得湿地面积得到极大恢复,然而退化生态系统的功能恢复仍需要经历漫长时间^[27],如何科学保障湿地功能恢复将成为未来湿地保护的目标。

1.2 建立 Marsh Organ 中型实验生态系统

本研究于2023年4月21日—28日在保护区内建立Marsh Organ中型实验生态系统^[28-29](详见附录和图1),选取了莫莫格湿地浅水区、深水区和高地生境的代表性植被芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Typha orientalis* C. Presl)、扁秆藨草(*Bolboschoenus planiculmis*)、三江藨草(*Schoenoplectus nipponicus*)和碱蓬(*Suaeda glauca*) (表1),探究水陆过渡区碳排放特征,根据植被原生生境的适宜水深范围,结合实验样点的水位波动情况及原生生境植被分布情况分别设计了5个水深梯度,其中三江藨草的土壤表层距离地面高度分别为-30、-20、-10、0、10 cm;香蒲的土壤表层距离地面高度分别为-10、0、10、20、30 cm;扁秆藨草和芦苇的高度为0、10、20、30、40 cm;碱蓬的高度为10、20、30、40、50 cm。截至2023年6月,实验区各个植被实际水深范围为:三江藨草为0~60 cm,扁秆藨草为-17~41 cm,芦苇为-12~41 cm,香蒲为-18~46 cm,碱蓬为-18~3 cm(表1)。该实验的布设旨在微缩湿地系统中模拟不同水深对碳排放的影响。

表1 代表性植被实验设计生境与最佳生境对比

Tab.1 Comparison between representative vegetation experimental design habitat and optimal habitat

植被名称	实验水深范围/cm	代表生境	适宜水深范围/cm	最佳水深范围/cm	参考文献
芦苇	-12~41	浅水区	-60~70	35~45	[30]
香蒲	-18~46	浅水区	0~100	9~19	[31]
扁秆藨草	-17~41	浅水区	-20~50	10~20	[32]
三江藨草	0~60	深水区	0~130	35~40	[32]
碱蓬	-18~3	高地	-70~6	-50~3	[33]

1.3 样品采集与分析方法

在2023年6月14日—21日(植被生长的初期阶段)进行样品采集,此时莫莫格湿地正处于平水季(图1b)。为了与真实环境碳排放数据进行对比,本研究在监测Marsh Organ数据的同时选取原位植被进行监测,因三江藨草所在区域较远,且生长区域采样危险性较大,故只选取了碱蓬、芦苇、扁秆藨草和香蒲4种植被进行原位监测。采用静态箱—气相色谱法测定^[34]CO₂和CH₄的排放通量(详见附录)。分别于9:00、11:00、13:00、15:00四个时段内对Marsh Organ实验样柱内生态系统(包括沉积物、水体和植被)进行为期

1 h 的气体样品收集,同时采集原位植被气体排放样品作为对照。对采集气体样品的环境数据进行记录,具体包括:手持微型气象仪同步监测气温、气压、空气湿度等气象数据;现场测量水深、植被高度和密度;用环刀现场采集 10~30 cm 土壤样品,测定土壤 10, 20 和 30 cm 含水量。考虑到:(1)并非所有的实验土柱都淹没在水下,水温数据并不齐全,不方便对比全部数据;(2)在气候变化背景下,气温是直接影响生态系统碳排放的环境因素,因此本研究选用气温作为温度依赖性的计算对象。

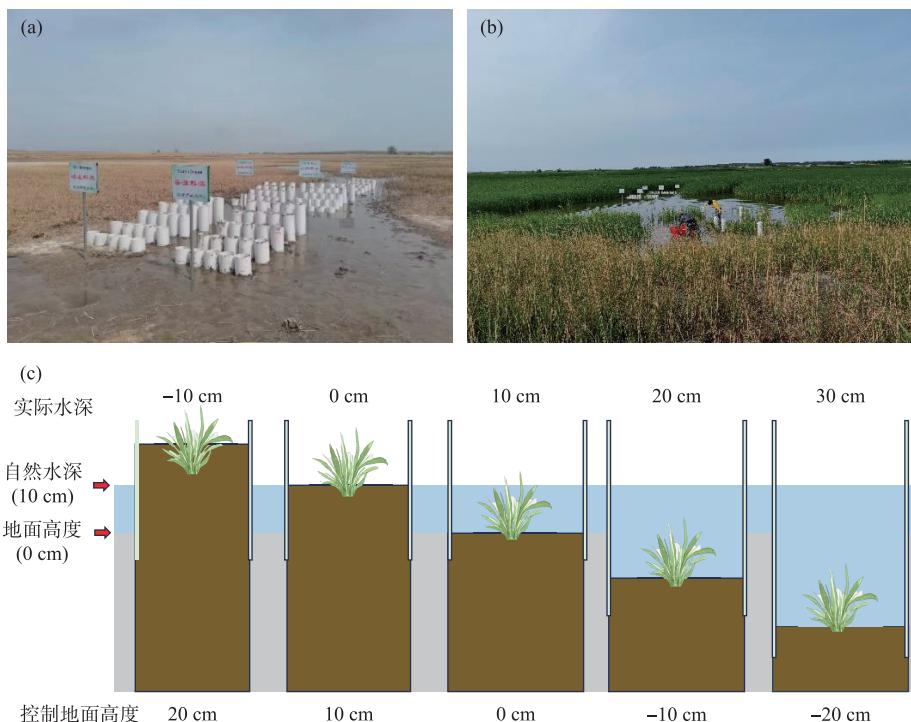


图 1 实验布设现场及 Marsh Organ 侧面示意图
(a: 实验布设初期(4月)现场; b: 6月采样现场; c: Marsh Organ 实验剖面示意图)

Fig.1 Experimental layout site and a side view of Marsh Organ
(a: The initial stage of experiment layout in April; b: Sampling site in June;
c: Schematic diagram of Marsh Organ experiment section)

1.4 温度依赖性计算

使用基于 Boltzmann Arrhenius 函数的混合效应模型^[12,35-40]评估了 5 种典型植被在不同水深条件下的温度依赖性,并量化和比较了不同植被和水深区间的温度依赖性差异(详见附录)。

1.5 基于分段回归模型的水深阈值识别

运用分段回归模型识别碳排放对水深的响应,判识影响湿地碳排放的关键水深阈值^[41-43],该方法被广泛用作生态阈值的识别,具体公式详见附录。

2 主要结果分析

2.1 不同植物碳排放通量规律

Marsh Organ 实验中不同植被的碳排放分析结果(图 2)显示,研究水深范围内代表性植被生长季 CH₄ 排放通量范围为 0.07~86.74 mg/(m²·h),平均值为 8.89 mg/(m²·h);CO₂ 排放通量范围为 10.59~1891.08 mg/(m²·h),平均值为 450.12 mg/(m²·h)。芦苇和香蒲的 CH₄ 排放通量显著高于其他植被($P < 0.05$),CH₄ 排放

通量的大小顺序为芦苇($20.0 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)>香蒲($13.7 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)>藨草($4.2 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $2.3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)>碱蓬($1.4 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)。藨草的平均 CO_2 排放通量最高(扁秆藨草为 $611.8 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,三江藨草为 $538.2 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$),其次为香蒲和芦苇($450.9 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $426.6 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$),碱蓬的 CO_2 排放通量最低($55.2 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)。与原位植被碳排放通量相比,Marsh Organ 实验中 CH_4 排放通量明显偏高,其中芦苇和香蒲的 CH_4 排放通量显著偏高($P<0.05$);而 Marsh Organ 实验中 CO_2 排放通量偏低,扁秆藨草显著低于原位植被 CO_2 排放通量($P<0.05$)。

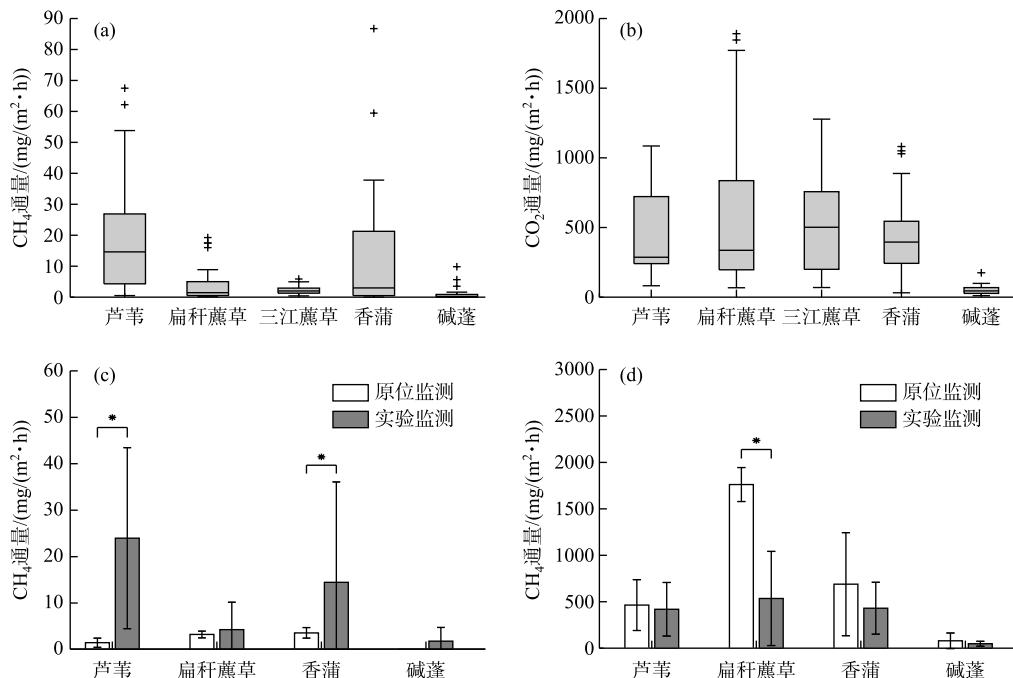


图 2 不同植被类型的碳排放通量
Fig.2 Carbon emission fluxes of different vegetation types

2.2 莫莫格湿地碳排放通量及其主要环境驱动因子识别

碳排放与环境因子的相关性分析结果(图 3)表明, CH_4 排放通量与空气湿度、植被密度、相对地面高度、实测水深、 CO_2 排放通量、气温和表层 10 cm 土壤含水率呈显著相关($P<0.05$),其中与水深的相关性最高($r=0.92$),与气温($r=0.69$)、表层 10 cm 土壤含水量($r=0.61$)的相关性次之;与地面高度($r=-0.92$)、植被密度($r=-0.80$)和空气湿度($r=-0.88$)呈显著负相关($P<0.05$)。 CO_2 排放通量与空气湿度、相对地面高度、实测水深、 CH_4 排放通量、气温和表层 10 cm 土壤含水率显著相关($P<0.05$),其中与气温($r=0.64$)、水深($r=0.74$)和表层 10 cm 土壤含水量($r=0.69$)三者相关性最高,其次为植被种类($r=0.31$);与地面高度(-0.74)和空气湿度(-0.76)呈显著负相关($P<0.05$)。

2.3 不同水深梯度下碳排放规律及其水深阈值

在 Marsh Organ 实验中设置了涉及 $-20\sim60 \text{ cm}$ 水深范围的 9 种水深梯度。由图 4a 可知, CH_4 排放通量在研究水深范围内整体呈现单峰型,具体为在 $-10\sim30 \text{ cm}$ 水深范围内排放通量($13\sim29 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)高于其他水深范围,在 10 cm 水深下排放通量最高($29 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$),在 -20 cm 、 0 cm 和 $40\sim60 \text{ cm}$ 水深区间内 CH_4 排放量最低($1\sim6 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)。由图 4b 可知, CO_2 排放通量在该水深范围内呈现中间低、两边高的排放规律,具体为在 -20 和 50 cm 水深区间的排放通量(792 和 $712 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)高于其他水深区间,在 $-10\sim0 \text{ cm}$ 、 60 cm 水深梯度排放通量为 $434\sim576 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,在 $10\sim40 \text{ cm}$ 水深区间内排放通量最低($243\sim365 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)。

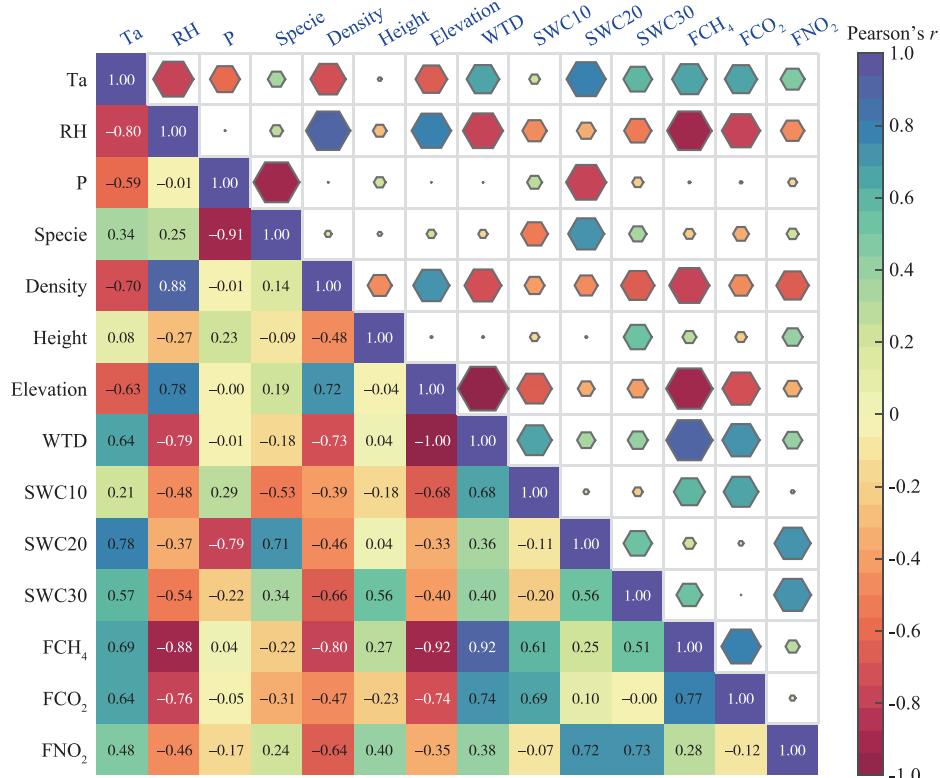


图 3 碳排放通量与环境因子的相关性分析结果

(Ta: 气温; RH: 空气湿度; P: 气压; Specie: 植被种类 (1-芦苇; 2-扁秆藨草; 3-三江藨草; 4-香蒲; 5-碱蓬); Density: 植被密度; Height: 植被高度; Elevation: 相对地面高度; WTD: 实测水深; SWC10: 表层 10 cm 土壤含水率; SWC20: 表层 20 cm 土壤含水率; SWC30: 表层 30 cm 土壤含水率; FCH₄: CH₄通量; FCO₂: CO₂通量; FNO₂: NO₂通量)

Fig.3 Correlation analysis results of carbon flux and environmental factors

(Ta: the temperature; Rh: air humidity; P: air pressure; Specie: vegetation type (1-*Phragmites australis*; 2-*Bolboschoenus planiculmis*; 3-*Schoenoplectus nipponicus*; 4-*Typha orientalis* C. Presl; 5-*Suaeda glauca*); Density: the density of vegetation; Height: the height of the vegetation; Elevation: relative ground height; WTD: the measured depth; SWC10: the surface 10 cm soil water content; SWC20: the surface 20 cm soil water content; SWC30: the surface 30 cm soil water content; FCH₄: the flux of CH₄; FCO₂: the flux of CO₂; FNO₂: the flux of NO₂)

(m²·h)), 10 cm 水深范围内 CO₂ 排放通量最低, 为 243 mg/(m²·h)。

根据植被在各个水深范围内的碳排放分析可知, 芦苇在-10 cm 和 30 cm 处 CH₄ 排放通量最大(28~30 mg/(m²·h)), 香蒲在 10 cm、50 cm 水深处 CH₄ 排放通量最大(22~30 mg/(m²·h)), 扁秆藨草的 CH₄ 排放峰值出现在水深-10 cm 处(11 mg/(m²·h)), 三江藨草的 CH₄ 排放峰值出现在水深 40 cm 处(3 mg/(m²·h)), 碱蓬的 CH₄ 排放峰值出现在水深 20 cm 处(4 mg/(m²·h))(图 4c)。扁秆藨草在水深-20 cm 处 CO₂ 排放通量最大(1846 mg/(m²·h)), 三江藨草在水深 50 cm 处 CO₂ 排放通量最大(817 mg/(m²·h)), 芦苇在水深 0 cm 处 CO₂ 排放通量最大(810 mg/(m²·h)), 香蒲在水深-20 和 30 cm 处 CO₂ 排放通量最大(572~581 mg/(m²·h)), 碱蓬在水深 20 cm 处 CO₂ 排放通量最大(76 mg/(m²·h))(图 4d)。

利用实测水位深度与碳排放进行水深阈值划分, CH₄ 排放通量在 22 cm 水深处呈排放峰值, 在低于 22

cm 水深处水深与 CH_4 排放通量呈不显著的微弱正相关($k=0.06, P=0.73$),超过 22 cm 则呈显著负相关($k=-0.39, P=0.05$) (图 4e)。 CO_2 排放通量在 22 cm 水深处呈现排放谷值,低于 22 cm 水深处水深与 CO_2 排放通量呈显著负相关($k=-10.24, P=0.04$),高于 22 cm 处呈显著正相关($k=13.41, P<0.0005$) (图 4f)。同时,当水深大于临界值 22 cm 时, CH_4 排放($|k|=0.06 < |k|=0.39$)和 CO_2 排放($|k|=10.24 < |k|=13.41$)对水深的敏感性均有所增加。

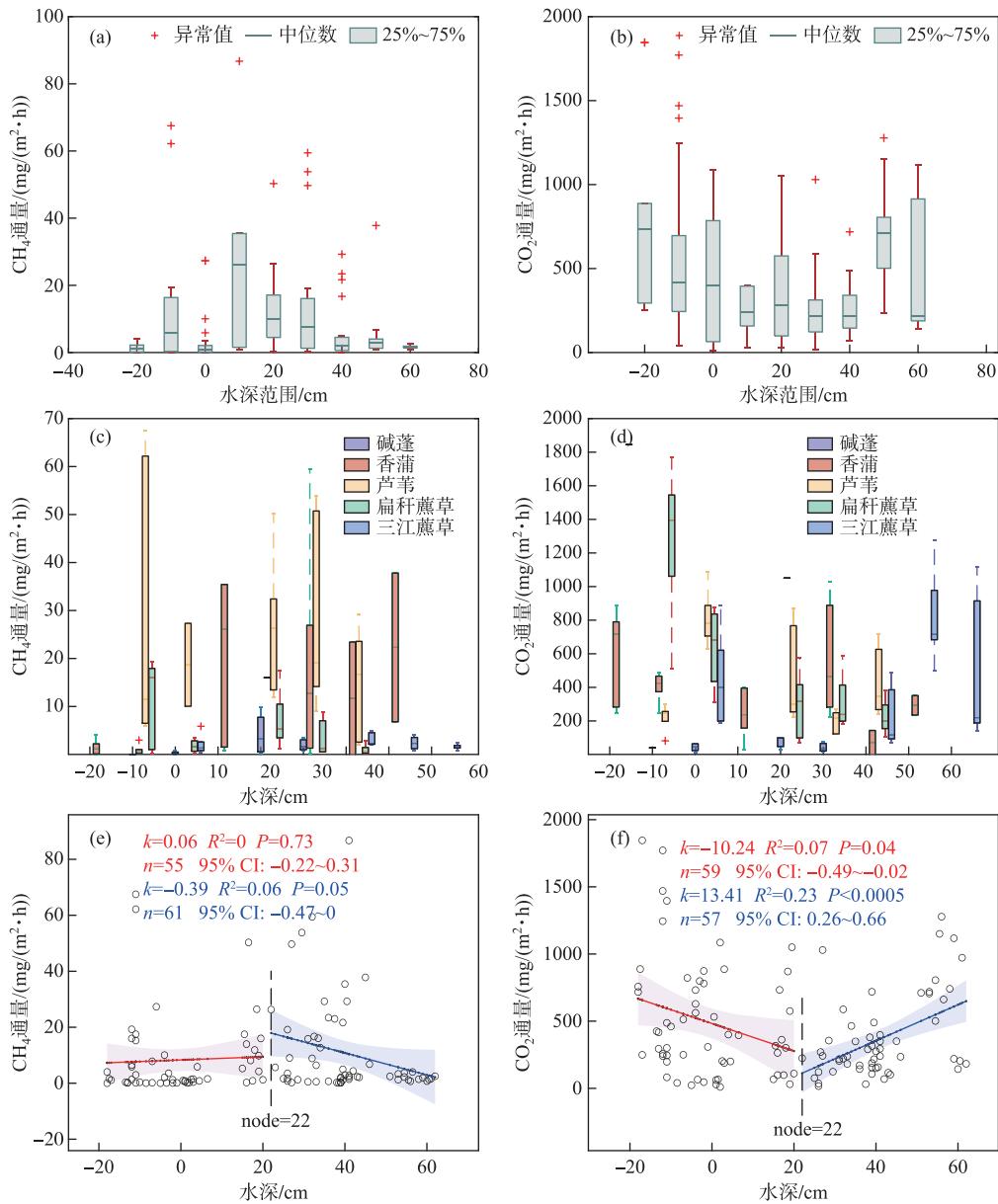


图 4 不同水深梯度下碳排放规律及其水深阈值

Fig.4 Carbon emission rule and water depth threshold under different water depth gradients

2.4 不同环境条件下碳排放温度依赖性特征

研究计算了 Marsh Organ 实验碳排放的温度依赖性(图 5), CH_4 排放通量的温度依赖性($E=2.34 \text{ eV}$)显著

高于 CO_2 ($\bar{E}=0.81 \text{ eV}$) (图 5a、b)。在 CH_4 排放通量的温度依赖性中, 香蒲的温度依赖性最大 ($\bar{E}=5.77 \text{ eV}$), 其次是扁秆藨草 ($\bar{E}=3.57 \text{ eV}$) 和芦苇 ($\bar{E}=2 \text{ eV}$), 碱蓬的 CH_4 温度依赖性呈现负值 ($\bar{E}=-0.91 \text{ eV}$) (图 5c)。 CO_2 排放通量的温度依赖性结果显示, 碱蓬、香蒲和扁秆藨草的温度依赖性接近 ($\bar{E}=1.53 \sim 1.69 \text{ eV}$), 其次是芦苇 ($\bar{E}=1.01 \text{ eV}$), 三江藨草的 CO_2 温度依赖性呈现负值 ($\bar{E}=-0.74 \text{ eV}$) (图 5d)。

按照水深阈值将数据进行分类, 计算温度依赖性。结果表明, 当水深低于水深阈值 22 cm 时, CH_4 ($\bar{E}=1.64 \text{ eV}, P=0.04$) 和 CO_2 ($\bar{E}=0.98 \text{ eV}, P=0.01$) 排放通量均呈现出较好的温度依赖性; 而高于水深阈值时, CH_4 ($\bar{E}=0.37 \text{ eV}, P=0.71$) 和 CO_2 ($\bar{E}=-0.38 \text{ eV}, P=0.47$) 排放通量的温度依赖性不显著, 并且温度依赖性显著降低, 甚至 CO_2 的温度依赖性呈现负值。

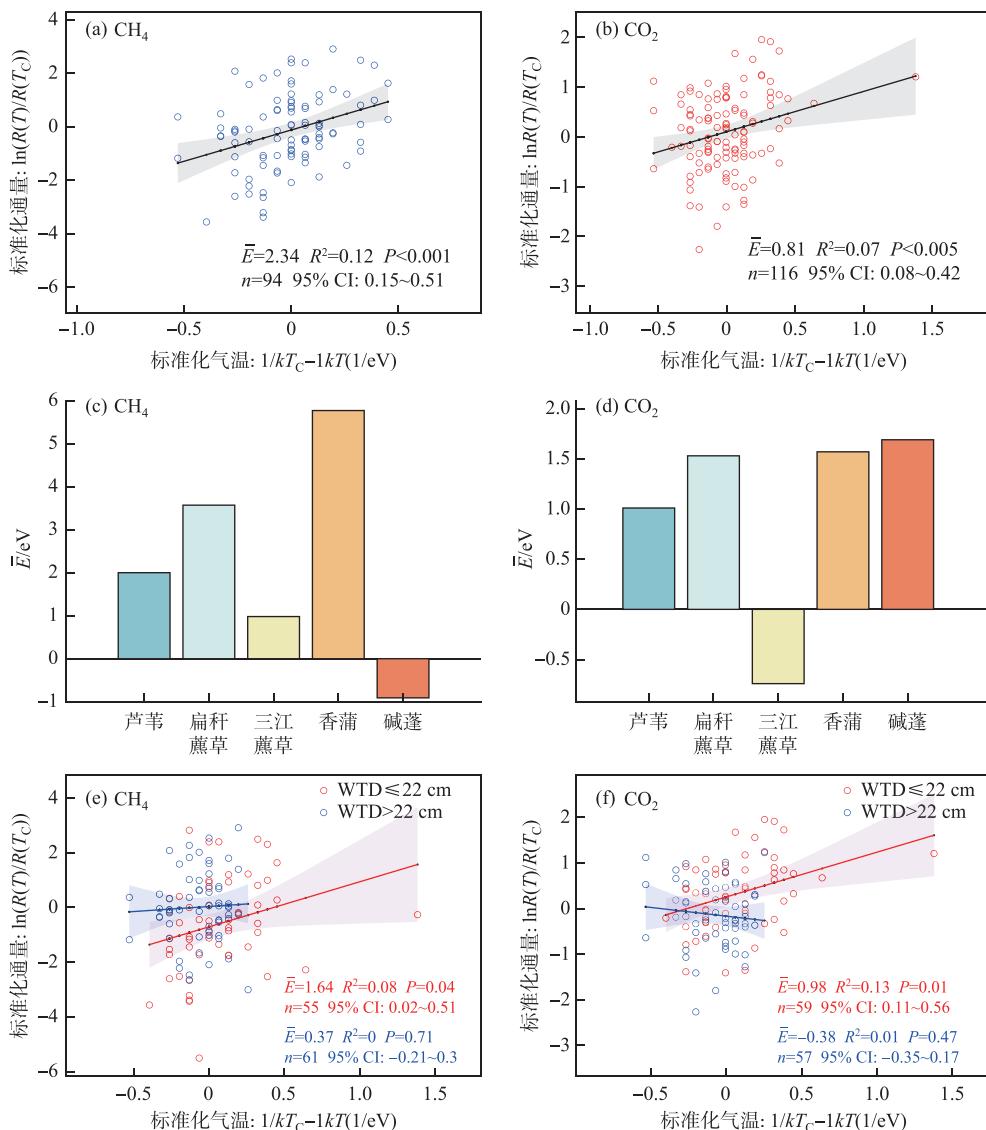


图 5 不同环境条件下碳排放温度依赖性特征

Fig.5 Temperature dependence characteristics of carbon emissions under different environmental conditions

3 讨论

3.1 植被组成对湿地碳排放的影响

研究表明以维管植物为主的湿地碳排放与植被种类关系密切^[44-45],本研究结果与之相吻合。植被种类与碳排放间存在相关性(图2a、b,图3,图4c、d),可以从3个方面进行解释:(1)首先根据生态系统代谢理论,在个体水平上代谢率与体重呈正比^[38],因此体型更大的植被可能会产生更多的碳排放^[35]。这与本研究中碱蓬碳排放通量远低于其他植被种类的结果相吻合。(2)其次,依据 Hutchinson 生态位理论^[46],沼泽植被在各水深范围内呈带状分布,不同植被所处的水深环境形成了CO₂和CH₄不同的产生、氧化、运输和排放模式。水位波动通过调节厌、好氧环境直接控制碳排放通量。由于碱蓬生长于低水深、较为干燥的环境,其有氧环境不利于CH₄的产生和排放;三江藨草的适宜水深范围较深,厌氧环境不利于CO₂的排放。相应地,由于适宜水位的差异,不同植被种类的碳排放对温度的响应也存在差异:一方面温度控制着生物活性及其呼吸速率从而影响碳排放^[35,47];而另一方面温度和水深通过控制植被的生长状况间接影响碳排放状况。本研究中,温度升高会加剧蒸发,从而促使生长于干燥环境的碱蓬处于水分匮乏状态,不利于CH₄的产生。因此,碱蓬CH₄温度依赖性呈现负值(图5e),而三江藨草物候节律较晚^[48],采样时植被仍处于萌芽阶段,其高度未超过水面,CO₂排放温度依赖性呈现负相关(图5f)。(3)当植被处于最适生存环境时具有最佳活性,从而导致该种植被碳排放量最大。在生理最优水分梯度下,植被活性最佳,当水深超过植被的耐受阈值时,水分通过厌氧胁迫降低植被活性^[49],从而导致植物成因的碳排放降低。同时,由于基质竞争,在生长季碳排放量与植被高度和密度呈现负相关^[50](附图I)。

3.2 湿地碳排放的水深阈值

大量研究表明,由于CH₄复杂的产生、传输和排放过程,使得甲烷排放通量与水深呈现分段规律,即在20 cm以下呈指数关系,在20 cm以上呈负指数关系^[3,51-52]。这与本研究所得出的CH₄排放水深阈值(22 cm)相吻合(图4e)。甲烷通常在厌氧环境中产生,当水深过低时,表层氧化环境抑制厌氧分解和产甲烷菌的活性,从而减少CH₄的产生^[22];深层厌氧环境下所产生的CH₄在向上输送时,一方面被氧化反应所消耗,另一方面被湿地植物(如芦苇)根际释放的氧气所氧化^[50]。因此,CH₄的排放与水深呈现正相关(图4e)。当水深处在临界值22 cm附近时,土壤中厌氧分解和产甲烷菌非常活跃,较高的水深和丰富的有机质使得形成甲烷的基质非常丰富,厌氧环境使得甲烷产量达到高峰^[53];同时甲烷在传输过程中消耗较低,排放途径包括植物排放、土壤排放和气泡排放。研究表明气泡排放是内陆水域CH₄通量的主要排放方式,可占总量的62%~84%^[54],因此呈现排放高峰。一旦超过临界值,过深的水体将形成扩散屏障,对CH₄的排放产生阻碍作用,因此CH₄排放通量与水深呈现负相关(图4e)。

水深对CO₂排放的影响也呈现复杂的关系^[7,55-56]。在本研究中,水深与CO₂的排放通量同样以22 cm为分界点呈现分段规律(图4f)。这是因为CO₂的排放主要来自土壤呼吸、根系呼吸和地上植物呼吸3部分,并在好氧环境下进行^[57]。当水深小于临界值时,通过调节土壤垂直剖面的厌氧区和好氧区来调节土壤有机物的分解速率^[56],会影响土壤呼吸;同时,淹水胁迫也会抑制根系呼吸^[58]。因此,水深与CO₂排放通量呈现负相关(图4f)。然而,本研究所选取的植被种类多为挺水植被,其生理最优水分梯度为10~40 cm(表1)。当水深大于临界值时,将导致植物生长状态的改变,有助于地上植被的生长(附图I),增加总初级生产力,从而促进生态系统CO₂排放。上述机理导致水深大于22 cm时,水深与CO₂排放呈现正相关(图3f)。值得说明的是,由于Marsh Organ实验主要探究多种水深对碳排放的影响,因此高水深的情景可能造成CH₄排放通量比实际偏高但CO₂排放通量比实际偏低的现象(图2)。上述结果也说明不同水深梯度对于芦苇和香蒲CH₄排放通量的影响最显著($P<0.05$),对扁秆藨草CO₂排放通量的影响最显著($P<0.05$)。

3.3 不同水深条件下的温度依赖性

以往研究表明,温度对生态系统呼吸的影响受到个体生理的温度敏感性、群落组成和生态系统中各个物种间的相互作用影响^[59-60]。大量实验研究表明,由于产生机制的差异,CH₄排放比CO₂排放具有更高的温度依赖性^[12,61],这与本结果一致(2.34 eV 和 0.81 eV)。有学者认为,湿地CO₂排放通量的温度依赖性不随水深的变化而变化,而CH₄的温度依赖性则随水深增加而增加^[12],本研究结果与其相反:即当水深大于临界

值时,碳排放对水深的敏感性增高(图 4e,f),而对于温度的敏感性降低(图 5e,f)。这是因为本研究使用的单月数据,气温差距有限而水深梯度差异明显,当水深大于 22 cm 时,气温向土壤和水面的传递效率受到水柱屏障的影响而降低,从而大大削弱了气温对植被、土壤微生物活性的影响,导致与温度的相关性不显著。本研究结果呈现了同一湿地内不同植被类型在不同水深的温度依赖性变化,有待于长时间序列数据的进一步验证。本结果侧面印证了短时间内水深的增加仅仅是提高了植被的生长状态从而导致碳排放的增加,而不利于生态系统整体生物活性的增加。因此,当水深在适宜范围内(本研究为 22~60 cm),生态系统将更有利应对气候变暖。在较低水深范围(本研究为 -20~22 cm),土壤水分长期处于充盈阶段。研究表明,湿地表层土壤的通气状况对温室气体排放,特别是 CH₄ 的排放影响显著^[62-64],因此温度成为影响碳排放的主要因素,从而表现出较大的温度依赖性。研究结果表明升温会极大触发浅水区或水陆过渡区的碳排放,改变湿地碳排放格局,影响到湿地碳功能的稳定。

4 结论

1) 水深、气温和表层 10 cm 土壤含水量与碳排放显著相关且影响最大。2) 芦苇和香蒲分布区是莫莫格湿地水陆过渡区 CH₄ 排放的主要贡献者,而藨草分布区是 CO₂ 排放的主要贡献者。3) 生长季莫莫格湿地水陆过渡区碳排放对水热的响应呈现差异。其中 CO₂ 排放对频繁的水深变化响应更敏感,CH₄ 排放对升温更敏感。4) 湿地碳排放对水深和温度变化的响应具有一定阈值特征。当水深大于 22 cm 时,碳排放对水深变化更敏感;当水深低于 22 cm 时,碳排放对温度变化更敏感。

致谢:感谢莫莫格保护区对本研究的大力支持,特别感谢汤佰军和孟凡波师傅在野外采样和实验中提供的帮助。

5 附录

附录见电子版(DOI: 10.18307/2025.0126)。

6 参考文献

- [1] Chen H, Yu ZC, Wu N et al. "C-wetland": A new paradigm to enhance conservation of carbon-rich wetlands. *Innovation*: Cambridge: Mass., 2023, 4(2): 100403. DOI: 10.1016/j.innn.2023.100403.
- [2] Zuo YJ, Wang YH, He LY et al. Modeling methane dynamics in three wetlands in Northeastern China by using the CLM-Microbe model. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2022, 8(1). DOI: 10.1080/20964129.2022.2074895.
- [3] Calabrese S, Garcia A, Wilmoth JL et al. Critical inundation level for methane emissions from wetlands. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(4): 044038. DOI: 10.1088/1748-9326/abedea.
- [4] Crill PM, Thornton BF. Whither methane in the IPCC process? *Nature Climate Change*, 2017, 7: 678-680. DOI: 10.1038/nclimate3403.
- [5] Bao T, Jia GS, Xu XY. Weakening greenhouse gas sink of pristine wetlands under warming. *Nature Climate Change*, 2023, 13: 462-469. DOI: 10.1038/s41558-023-01637-0.
- [6] Ning Y, Zhang ZX, Cui LJ et al. Vegetation composition of Momoge wetland and its implications for succession in alkaline wetland. *Journal of Beijing Forestry University*, 2014, 36(6): 1-8.
- [7] Yao XC, Song CC. Effect of different factors dominated by water level environment on wetland carbon emissions. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(49): 74150-74162. DOI: 10.1007/s11356-022-20289-9.
- [8] Moore TR, Roulet NT. Methane flux: Water table relations in northern wetlands. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(7): 587-590. DOI: 10.1029/93GL00208.
- [9] Yuan XM, Liu Q, Cui BS et al. Effect of water-level fluctuations on methane and carbon dioxide dynamics in a shallow lake of Northern China: Implications for wetland restoration. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 126169. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126169.
- [10] Yuan XM, Liu Q, Li SZ et al. Water level fluctuation controls carbon emission fluxes in a shallow lake in China. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10: 1086072. DOI: 10.3389/feart.2022.1086072.
- [11] Yao X, Song C. Effect of different factors dominated by water level environment on wetland carbon emissions. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(49): 74150-74162. DOI: 10.1007/s11356-022-20289-9.
- [12] Chen HY, Xu X, Fang CM et al. Differences in the temperature dependence of wetland CO₂ and CH₄ emissions vary with water table depth. *Nature Climate Change*, 2021, 11: 766-771. DOI: 10.1038/s41558-021-01108-4.
- [13] Yu XF, Ding SS, Zou YC et al. Review of rapid transformation of floodplain wetlands in Northeast China: Roles of human development and

- global environmental change. *Chinese Geographical Science*, 2018, **28**(4): 654-664. DOI: 10.1007/s11769-018-0957-3.
- [14] Ye SY, Pei LX, He L et al. Wetlands in China: Evolution, carbon sequestrations and services, threats, and preservation/restoration. *Water*, 2022, **14**(7): 1152. DOI: 10.3390/w14071152.
- [15] Wei D, Wang XD. Uncertainty and dynamics of natural wetland CH₄ release in China: Research status and priorities. *Atmospheric Environment*, 2017, **154**: 95-105. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.01.038.
- [16] Song F, Su FL, Mi CX et al. Analysis of driving forces on wetland ecosystem services value change: A case in Northeast China. *Science of the Total Environment*, 2021, **751**: 141778. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141778.
- [17] Zhang D, Gong C, Zhang WG et al. Labile carbon addition alters soil organic carbon mineralization but not its temperature sensitivity in a freshwater marsh of Northeast China. *Applied Soil Ecology*, 2021, **160**: 103844. DOI: 10.1016/j.apsoil.2020.103844.
- [18] Sun XX, Wang HJ, Song CC et al. Response of methane and nitrous oxide emissions from peatlands to permafrost thawing in Xiaoxing'an mountains, Northeast China. *Atmosphere*, 2021, **12**(2): 222. DOI: 10.3390/atmos12020222.
- [19] Sun L, Song CC, Lafleur PM et al. Wetland-atmosphere methane exchange in Northeast China: A comparison of permafrost peatland and freshwater wetlands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, **249**: 239-249. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.11.009.
- [20] Gong C, Song CC, Zhang D et al. Litter manipulation strongly affects CO₂ emissions and temperature sensitivity in a temperate freshwater marsh of northeastern China. *Ecological Indicators*, 2019, **97**: 410-418. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.10.021.
- [21] Zhang YP, Liu FQ, Liang H et al. Mediative mechanism of freezing/thawing on greenhouse gas emissions in an inland saline-alkaline wetland: A metagenomic analysis. *Microbial Ecology*, 2023, **86**(2): 985-996. DOI: 10.1007/s00248-022-02165-8.
- [22] Liu FQ, Zhang YP, Liang H et al. Resilience of methane cycle and microbial functional genes to drought and flood in an alkaline wetland: A metagenomic analysis. *Chemosphere*, 2021, **265**: 129034. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129034.
- [23] Li F, Li HJ, Su HH et al. Effects of salinity on methane emissions and methanogenic archaeal communities in different habitat of saline-al-kali wetlands. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, **30**(48): 106378-106389. DOI: 10.1007/s11356-023-29922-7.
- [24] Liu Y, Cui G, Tong SZ et al. Determination of the hydrodynamic characteristics of a typical inland saline-alkali wetland in Northeast China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, **10**: 939431. DOI: 10.3389/fevo.2022.939431.
- [25] Zhang DJ, Qi Q, Wang XH et al. Physiological responses of *Carex schmidii* Meinh to alternating flooding-drought conditions in the Momoge wetland, Northeast China. *Aquatic Botany*, 2019, **153**: 33-39. DOI: 10.1016/j.aquabot.2018.11.010.
- [26] 姚艳玲, 张宇, 张正等. 莫莫格湿地生态补水效益评估. 合肥: 中国环境科学学会科学技术年会, 2018.
- [27] Moreno-Mateos D, Alberdi A, Morriën E et al. The long-term restoration of ecosystem complexity. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, **4**: 676-685. DOI: 10.1038/s41559-020-1154-1.
- [28] Morris JT, Sundareshwar PV, Nietch CT et al. Responses of coastal wetlands to rising sea level. *Ecology*, 2002, **83**(10): 2869-2877. DOI: 10.1890/0012-9658(2002)083[2869: ROCWTR]2.0.CO;2.
- [29] Cherry JA, Ramseur GS Jr, Sparks EL et al. Testing sea-level rise impacts in tidal wetlands: A novel *in situ* approach. *Methods in Ecology and Evolution*, 2015, **6**(12): 1443-1451. DOI: 10.1111/2041-210X.12441.
- [30] Deng CN, Zhang XG, Pan XL. Eco-physiological responses of *Phragmites australis* to different water depth in Momoge Wetland. *Ecological Science*, 2012, **31**(4): 352-356. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8873.2012.04.002. [邓春暖, 章光新, 潘响亮. 莫莫格湿地芦苇生理生态特征对水深梯度的响应. 生态科学, 2012, **31**(4): 352-356.]
- [31] 汤思文. 水分条件及淹水对香蒲幼苗生长、生理的影响[学位论文]. 南昌: 江西师范大学, 2020.
- [32] 古勇波. 扁秆藨草和三江藨草功能性状对不同环境因子的响应[学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2019.
- [33] 赵子滔. 盐度和水淹时长对盐地碱蓬影响的机制研究[学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- [34] Gao MY, Kong FL, Xi M et al. Effects of environmental conditions and aboveground biomass on CO₂ budget in *Phragmites australis* wetland of Jiaozhou Bay, China. *Chinese Geographical Science*, 2017, **27**(4): 539-551. DOI: 10.1007/s11769-017-0886-6.
- [35] Allen AP, Gillooly JF, Brown JH. Linking the global carbon cycle to individual metabolism. *Functional Ecology*, 2005, **19**(2): 202-213. DOI: 10.1111/j.1365-2435.2005.00952.x.
- [36] Enquist BJ, Kerkhoff AJ, Huxman TE et al. Adaptive differences in plant physiology and ecosystem paradoxes: Insights from metabolic scaling theory. *Global Change Biology*, 2007, **13**(3): 591-609. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01222.x.
- [37] Gillooly JF, Brown JH, West GB et al. Effects of size and temperature on metabolic rate. *Science*, 2001, **293**(5538): 2248-2251. DOI: 10.1126/science.1061967.
- [38] Brown JH, Gillooly JF, Allen AP et al. Toward a metabolic theory of ecology. *Ecology*, 2004, **85**(7): 1771-1789. DOI: 10.1890/03-9000.
- [39] Enquist BJ, Economo EP, Huxman TE et al. Scaling metabolism from organisms to ecosystems. *Nature*, 2003, **423**: 639-642. DOI: 10.1038/nature01671.
- [40] Chen HY, Zou JY, Cui J et al. Wetland drying increases the temperature sensitivity of soil respiration. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **120**: 24-27. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.01.035.
- [41] Liu Q, Yang YT, Liang LQ et al. Shift in precipitation-streamflow relationship induced by multi-year drought across global catchments. *Sci-*

- ence of the Total Environment, 2023, **857** (Pt 2) : 159560. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159560.
- [42] Toms JD, Lesperance ML. Piecewise regression: A tool for identifying ecological thresholds. *Ecology*, 2003, **84**(8) : 2034-2041. DOI: 10.1890/02-0472.
- [43] Yang YT, McVicar TR, Donohue RJ et al. Lags in hydrologic recovery following an extreme drought: Assessing the roles of climate and catchment characteristics. *Water Resources Research*, 2017, **53**(6) : 4821-4837. DOI: 10.1002/2017WR020683.
- [44] Yang T, He Q, Jiang J et al. Impact of water table on methane emission dynamics in terrestrial wetlands and implications on strategies for wetland management and restoration. *Wetlands*, 2022, **42**(8) : 120. DOI: 10.1007/s13157-022-01634-7.
- [45] Ding WX, Cai ZC, Tsuruta H et al. Effect of standing water depth on methane emissions from freshwater marshes in Northeast China. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(33) : 5149-5157. DOI: 10.1016/s1352-2310(02)00647-7.
- [46] Dussault AC. Does the study of facilitation require a revision of the Hutchinsonian niche concept? *Biology & Philosophy*, 2022, **37**(2) : 16. DOI: 10.1007/s10539-022-09844-3.
- [47] Johnston ASA, Meade A, Ardo J et al. Temperature thresholds of ecosystem respiration at a global scale. *Nature Ecology & Evolution*, 2021, **5** : 487-494. DOI: 10.1038/s41559-021-01398-z.
- [48] Shen XJ, Liu BH, Xue ZS et al. Spatiotemporal variation in vegetation spring phenology and its response to climate change in freshwater marshes of Northeast China. *Science of the Total Environment*, 2019, **666** : 1169-1177. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.265.
- [49] Yang J, Li E, Cai X et al. Research progress in response of plants in wetlands to water level change. *Wetland Science*, 2014, **12**(6) : 807-813.
- [50] Wang L, Zhou H, Liu C et al. The stimulation of high nutrients input to CH₄ emission in the Reed-dominated Wetlands. Chengdu: 35th World Congress of the International-Association-for-Hydro-Environment-Engineering-and-Research (IAHR), 2013 : 3166-3174.
- [51] Iwata H, Nakazawa K, Sato H et al. Temporal and spatial variations in methane emissions from the littoral zone of a shallow mid-latitude lake with steady methane bubble emission areas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, **295** : 108184. DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.108184.
- [52] Luta W, Ahmed O, Omar L et al. Water table fluctuation and methane emission in pineapples (*Ananas comosus* (L.) merr.) cultivated on a tropical peatland. *Agronomy*, 2021, **11**(8) : 1448. DOI: 10.3390/agronomy11081448.
- [53] Lin YX, Yuan JJ, Liu DY et al. Divergent responses of wetland methane emissions to elevated atmospheric CO₂ dependent on water table. *Water Research*, 2021, **205** : 117682. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117682.
- [54] Zheng YJ, Wu S, Xiao SQ et al. Global methane and nitrous oxide emissions from inland waters and estuaries. *Global Change Biology*, 2022, **28**(15) : 4713-4725. DOI: 10.1111/gcb.16233.
- [55] Zou JY, Ziegler AD, Chen DL et al. Rewetting global wetlands effectively reduces major greenhouse gas emissions. *Nature Geoscience*, 2022, **15** : 627-632. DOI: 10.1038/s41561-022-00989-0.
- [56] Zhao ML, Han GX, Li JY et al. Responses of soil CO₂ and CH₄ emissions to changing water table level in a coastal wetland. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **269** : 122316. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122316.
- [57] Wang WJ, Liang H, Li F et al. Water level of inland saline wetlands with implications for CO₂ and CH₄ fluxes during the autumn freeze-thaw period in Northeast China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, **30**(17) : 50125-50133. DOI: 10.1007/s11356-023-25862-4.
- [58] Juszczak R, Humphreys E, Acosta M et al. Ecosystem respiration in a heterogeneous temperate peatland and its sensitivity to peat temperature and water table depth. *Plant and Soil*, 2013, **366**(1) : 505-520. DOI: 10.1007/s11104-012-1441-y.
- [59] Yvon-Durocher G, Caffrey JM, Cescatti A et al. Reconciling the temperature dependence of respiration across timescales and ecosystem types. *Nature*, 2012, **487** : 472-476. DOI: 10.1038/nature11205.
- [60] Johnston ASA, Sibly RM. The influence of soil communities on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, **2** : 1597-1602. DOI: 10.1038/s41559-018-0648-6.
- [61] Barel JM, Moula V, Hamard S et al. Come rain, come shine: Peatland carbon dynamics shift under extreme precipitation. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, **9** : 659953. DOI: 10.3389/fenvs.2021.659953.
- [62] Segers R. Methane production and methane consumption: A review of processes underlying wetland methane fluxes. *Biogeochemistry*, 1998, **41**(1) : 23-51. DOI: 10.1023/a:1005929032764.
- [63] Schimel JP. Life in dry soils: Effects of drought on soil microbial communities and processes. In: Futuyma DJ ed. Annual review of ecology, evolution, and systematics, 2008, (49) : 409-432.
- [64] Cruz-Paredes C, Tájmel D, Rousk J. Can moisture affect temperature dependences of microbial growth and respiration? *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, **156** : 108223. DOI: 10.1016/j.soilbio.2021.108223.

附录

1 建立 Marsh Organ 中型实验生态系统

水深调控着植被分布，形成以水深范围内植被类型的空间分布格局。而湿地微地貌条件差异决定了由相对高度调控淹水频率和持续时间。盐碱湿地通过矿物沉积和有机物的积累，在很长时间内维持着一定的海拔高度，其与水位之间的相对高度决定了湿地面积的大小、淹没频率、持续时间及种类分布。因此，通过调节实验区的地面高度，将湿地不同淹水深度及频率的斑块映射到实验区，可有效模拟同一时间范围内自然水位波动情景下湿地不同淹水深度植被的受胁迫状态。本研究通过布设 Marsh Organ 中型实验生态系统，旨在通过控制实验斑块地表高度来模拟湿地内部不同淹水频率和持续时间，探究不同生态系统碳排放对水位波动的响应。该实验最早是由 Morris 于 2002 提出并用于探究地面高程—初级生产力—海平面上升三者之间的关系^[1]。本研究改进了实验装置，将其应用于量化盐碱湿地水陆过渡区碳排放的水深临界阈值。与传统的对照实验相比，该实验具有真实反映自然水位波动状态下植被生长状态变化的优点，真实反映了该地面高程下的水位，无需人为手动调控。

生态系统碳排放与植被种类、植被生长状况及土壤有机质含量相关。因此，本实验在控制地面高度时，首先根据不同植被的适宜生长水位及往年水位波动数据，设计合理的地面高度范围，并以 10 cm 作为高度梯度差，以保证植被的正常存活及生长；其次选取旧年原位生长目标植被的-60~0 cm 深度土壤回填在直径 20 cm 的 PVC 圆柱中，以最大程度还原生境，将其转移至实验区将该深度的土层进行替换，并保证土壤土层顺序不被破坏。地面高度则通过-60 cm 深度以下的土层增减进行控制。由于后期土层的压实、沉淀等因素，实际水深以采样期间的现场实测为准，根据不同水深梯度设计 PVC 圆柱的高度。PVC 圆柱内土壤表层与顶部保证 30 cm 的空间，以便后续气体采集及植被生长。圆柱底端插入土壤部分进行钻孔处理，保证水深连通。PVC 圆柱顶端设计密封接口，便于后续根据植被生长需求对圆柱进行增高，圆柱顶端平时处于开放状态，保证植被正常生长，气体采集时保持密封。每种植被不同水深设置 5 个重复，最大程度地保证了实验的容错率。最后在每个土柱中栽种不同目标植被，并保证其成活率。该步骤均在非生长季进行，以便生态系统有足够长的时间进行恢复和调整。

本研究于 2023 年 4 月 21—28 日在保护区建立 Marsh Organ 中型实验生态系统^[2]，探究水陆过渡区碳排放特征，布设点为 10 m × 20 m 的平坦空地（45°50'24"N, 123°12'00"E）。布设区域本身有地形高度变化，水深根据地势变化呈现梯度变化。调研区域内原生植被主要有芦苇、香蒲、扁秆藨草及碱蓬，其中芦苇为该地优势群落（占比约为 70%），其次是香蒲（占比约为 10%）和扁秆藨草（占比约为 10%），零星生长碱蓬（占比约为 5%），没有三江藨草。研究选取了莫莫格湿地浅水区、深水区和高地生境的代表性植被芦苇 (*Phragmites australis*)、香蒲 (*Typha orientalis* C. Presl)、扁秆藨草 (*Bolboschoenus planiculmis*)、三江藨草 (*Schoenoplectus nipponicus*) 和碱蓬 (*Suaeda glauca*)（表 1），其中扁秆藨草和三江藨草的球茎为白鹤的主要食物来源。芦苇、香蒲、扁秆藨草及碱蓬的土样及种子（球茎）均就近采集，三江藨草的球茎及土壤采集自鹅头泡（45°57'00"N, 123°27'36"E）。

2 静态箱—气相色谱法测定 CO₂ 和 CH₄ 的排放通量

采用加有底座的不透明 PVC 采样箱进行原位植被的温室气体采集，采样点设置 3 个重复，箱内置搅气小风扇以使箱内气体混合均匀，侧壁安装采气三通阀用于气体的采集，箱体规格为 30 cm×30 cm×30 cm。对于 Marsh Organ 实验采用直径为 20 cm 的圆形 PVC 管进行密闭采集，通过水封等措施保证箱体的密闭性，每个梯度设置 5 个重复。碳排放通量的计算公式为：

$$J = \frac{dc}{dt} \cdot \frac{M}{V_0} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot H \quad (1)$$

式中， J 为碳排放通量 (mg/(m²·h))， dc/dt 为目标气体在标准时间内的浓度变化斜率， M 为目标气体的摩尔质量（其中 CO₂ 气体的摩尔质量为 44 g/mol，CH₄ 气体的摩尔质量为 16 g/mol）， V_0 为标准大气压和绝对温度状态下的气体摩尔体积 (22.4 g/mol)， P 为采样时刻纪录气压 (kPa)， P_0 为标准状态下的大气压

(101.325 kPa), T 为采样时刻记录的绝对温度 (K), T_0 为标准状态下的绝对温度 (273.15 K), H 为水面或土面以上采样箱高度 (m)。

3 温度依赖性计算

据生态系统代谢理论^[3-4], 在 $0\text{--}30^\circ\text{C}$ 温度范围内, 遵循热力学定理^[5-7], 生物代谢率与碳排放受温度控制, 呈指数关系。基于生态系统代谢理论开发的在生物地球化学模型中^[3-4], 温度依赖性用来测量温度与碳排放之间的温度敏感性, 用活化能(E)来具体量化。该模型采用 Boltzmann Arrhenius 函数对温度和碳排放进行拟合, 并结合混合效应模型消除异质性(方程 2)^[8]。将不同植物种类利用其协方差结构嵌套到模型中, 加入随机效应部分, 使模型结果具有较好的规律性, 从而解决了不同植被基准值不同的问题。具体公式为:

$$\ln R_i(T) = (\bar{E} + \varepsilon_E^i) \left(\frac{1}{kT_C} - \frac{1}{kT} \right) + \overline{\ln R(T_C)} + \varepsilon_R^i \quad (2)$$

式中, $\ln R_i(T)$ 为植被种类 i 在绝对温度 $T(K)$ 下碳排放量 ($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) 的自然对数, \bar{E} 为植被种类 i 的平均表观活化能, 其大小表示温度依赖性, k 为玻尔兹曼常数($8.62 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$), T_C 为样本温度均值。

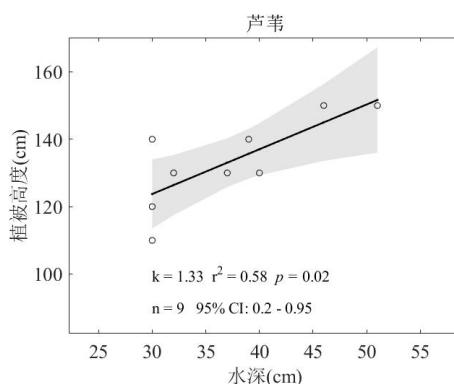
考虑到碳排放的温度依赖性受环境特征(如水深)和植被类型的影响, 假设在固定温度下, 不同植被类型的 $\ln R(T_C)$ 和 E 有所差异。因此, 在混合效应模型中, 将 \bar{E} 和 $\overline{\ln R(T_C)}$ 作为随机变量, 同时将 ε_E^i 和 ε_R^i 定义为偏离值。

4 基于分段回归模型的水深阈值识别

本文运用分段回归模型识别碳排放对水深的响应, 判识影响湿地碳排放的关键水深阈值^[9-11], 该方法被广泛用作生态阈值的识别, 具体公式为:

$$y_i = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 h_i + \varepsilon & h_i \leq \alpha \\ \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2(h - \alpha) + \varepsilon & h_i > \alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中, h_i 为第 i 个自变量水深 (cm), y_i 为水深 h_i 下对应的实际观测碳排放值 ($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), α 为水深阈值, ε 为方差恒定、平均误差为零、独立的、有限绝对矩的误差和, β_1 和 $\beta_1 + \beta_2$ 分别为水深阈值两侧线性拟合的回归系数, β_2 为两个线性回归的系数差异, 采用最小二乘线性回归估计两个回归系数, 并采用 t 检验来检验系数是否非零。



附图I 莫莫格湿地芦苇高度与水深的关系

Attached Fig.I Relationship between reed height and water depth in Momog wetland

参考文献

- [1] Morris JT, Sundareshwar PV, Netch CT et al. Responses of coastal wetlands to rising sea level. *Ecology*, 2002, **83**(10): 2869-2877. DOI: 10.1890/0012-9658(2002)083[2869: ROCWTR]2.0.CO;2.
- [2] Cherry JA, Ramseur GS Jr, Sparks EL et al. Testing sea-level rise impacts in tidal wetlands: A novel *in situ* approach. *Methods in Ecology and Evolution*, 2015, **6**(12): 1443-1451. DOI: 10.1111/2041-210X.12441.
- [3] Allen AP, Gillooly JF, Brown JH. Linking the global carbon cycle to individual metabolism. *Functional Ecology*, 2005, **19**(2): 202-213. DOI: 10.1111/j.1365-

2435.2005.00952.x.

- [4] Enquist BJ, Kerkhoff AJ, Huxman TE *et al.* Adaptive differences in plant physiology and ecosystem paradoxes: Insights from metabolic scaling theory. *Global Change Biology*, 2007, **13**(3): 591-609. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01222.x.
- [5] Gillooly JF, Brown JH, West GB *et al.* Effects of size and temperature on metabolic rate. *Science*, 2001, **293**(5538): 2248-2251. DOI: 10.1126/science.1061967.
- [6] Brown JH, Gillooly JF, Allen AP *et al.* Toward a metabolic theory of ecology. *Ecology*, 2004, **85**(7): 1771-1789. DOI: 10.1890/03-9000.
- [7] Enquist BJ, Economo EP, Huxman TE *et al.* Scaling metabolism from organisms to ecosystems. *Nature*, 2003, **423**: 639-642. DOI: 10.1038/nature01671.
- [8] Chen HY, Zou JY, Cui J *et al.* Wetland drying increases the temperature sensitivity of soil respiration. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **120**: 24-27. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.01.035.
- [9] Liu Q, Yang YT, Liang LQ *et al.* Shift in precipitation-streamflow relationship induced by multi-year drought across global catchments. *Science of the Total Environment*, 2023, **857**(Pt 2): 159560. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159560.
- [10] Toms JD, Lesperance ML. Piecewise regression: A tool for identifying ecological thresholds. *Ecology*, 2003, **84**(8): 2034-2041. DOI: 10.1890/02-0472.
- [11] Yang YT, McVicar TR, Donohue RJ *et al.* Lags in hydrologic recovery following an extreme drought: Assessing the roles of climate and catchment characteristics. *Water Resources Research*, 2017, **53**(6): 4821-4837. DOI: 10.1002/2017WR020683.