论文

中国草本沼泽植被地上生物量及其空间分布格局

神祥金¹, 姜明^{1*}, 吕宪国¹, 刘兴土¹, 刘波¹, 张佳琦¹, 王宪伟¹, 佟守正¹, 雷光春², 王升忠³, 全川⁴, 范航清⁵, 田昆⁶, 王晓龙⁷, 胡远满⁸, 谢永宏⁹, 马牧源¹⁰, 张树文¹, 曹春香¹¹, 王志臣¹²

1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102;
2. 北京林业大学自然保护区学院, 国家林业和草原局黄河流域生态保护重点实验室, 北京 100083;
3. 东北师范大学地理科学学院, 长春 130024;
4. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007;
5. 广西科学院广西红树林研究中心, 北海 536000;
6. 西南林业大学国家高原湿地研究中心, 昆明 650224;
7. 中国科学院南京地理与湖泊研究所流域地理学重点实验室, 南京 210008;
8. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016;
9. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125;
10. 中国林业科学研究院湿地研究所, 北京 100091;
11. 中国科学院空天信息创新研究院, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;
12. 国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100714

* 通讯作者, E-mail: jiangm@iga.ac.cn

收稿日期: 2020-09-19; 收修改稿日期: 2021-04-07; 接受日期: 2021-04-28; 网络版发表日期: 2021-05-26

国家科技基础性工作专项项目(编号: 2013FY111800)、国家自然科学基金项目(批准号: 41971065、U19A2042)、中国科学院前沿科学重点研究计划项目(编号: ZDBS-LY-7019)和中国科学院青年创新促进会项目(编号: 2019235)资助

摘要 草本沼泽是沼泽湿地生态系统中分布最广的沼泽类型, 具有涵养水源、调节气候、储碳固碳、提供珍稀物种栖息地等重要生态功能. 草本沼泽的固碳功能在减缓气候变暖, 维持区域环境稳定性等方面发挥着关键作用. 植被生物量是反映湿地固碳能力的重要指标, 明确沼泽湿地植被生物量可为估算沼泽湿地碳储量及固碳能力提供科学基础. 文章利用全国草本沼泽植被地上生物量实地调查数据, 结合中国沼泽湿地分布数据集, 首次从全国尺度对中国草本沼泽植被地上生物量及其空间分布格局进行了研究. 结果表明: 中国草本沼泽总面积为 $9.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 草本沼泽植被地上生物量平均密度为 $(227.5 \pm 23.0) \text{ g C m}^{-2}$ (95%置信区间, 下同), 总地上生物量为 $(22.2 \pm 2.2) \text{ Tg C}$ ($1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$). 中国草本沼泽植被地上生物量密度总体表现东北和青藏高原地区低、华北中部和滨海地区高的特点. 在中国不同沼泽分布区, 草本沼泽植被地上生物量平均密度从小到大依次为: 温带湿润半湿润沼泽区 $((182.3 \pm 49.3) \text{ g C m}^{-2}) < \text{青藏高原沼泽区} ((243.9 \pm 26.6) \text{ g C m}^{-2}) < \text{温带干旱半干旱沼泽区} ((300.5 \pm 73.2) \text{ g C m}^{-2}) < \text{亚热带湿润沼泽区} ((348.4 \pm 59.0) \text{ g C m}^{-2}) < \text{滨海沼泽区} ((675.4 \pm 73.8) \text{ g C m}^{-2})$. 由于草本沼泽面积的不同, 不同沼泽分布区草本沼泽植被总地上生物量在温带湿润半湿润沼泽区最大 $((9.6 \pm 2.6) \text{ Tg C})$, 而在滨海沼泽区最小 $((1.1$

中文引用格式: 神祥金, 姜明, 吕宪国, 刘兴土, 刘波, 张佳琦, 王宪伟, 佟守正, 雷光春, 王升忠, 全川, 范航清, 田昆, 王晓龙, 胡远满, 谢永宏, 马牧源, 张树文, 曹春香, 王志臣. 2021. 中国草本沼泽植被地上生物量及其空间分布格局. 中国科学: 地球科学, 51(8): 1306–1316, doi: [10.1360/SSTe-2020-0250](https://doi.org/10.1360/SSTe-2020-0250)
英文引用格式: Shen X, Jiang M, Lu X, Liu X, Liu B, Zhang J, Wang X, Tong S, Lei G, Wang S, Tong C, Fan H, Tian K, Wang X, Hu Y, Xie Y, Ma M, Zhang S, Cao C, Wang Z. 2021. Aboveground biomass and its spatial distribution pattern of herbaceous marsh vegetation in China. Science China Earth Sciences, 64(7): 1115–1125, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9778-7>

± 0.1) Tg C). 中国草本沼泽植被地上生物量空间分布具有明显的非地带性特征,但在部分地区也呈现出一定的地带性规律,青藏高原草本沼泽植被地上生物量总体随海拔的升高而降低,温带湿润半湿润区和温带干旱半干旱区草本沼泽植被地上生物量随干旱程度的增加先降低后趋于平缓,温带湿润半湿润区草本沼泽植被地上生物量在年均温度越高的地区相对越大. 研究结果可为精准评估沼泽湿地对气候的调节作用提供科学依据,为湿地生态系统适应性管理提供决策支持.

关键词 草本沼泽, 湿地, 植被, 地上生物量, 空间分布, 中国

1 引言

湿地与森林、海洋并称为全球三大生态系统(吕宪国, 2002). 湿地生态系统仅占全球陆地总面积的4~6%,但其碳储量占全球陆地碳储量的12~24%(IPCC, 2019). 沼泽湿地作为一种重要的湿地类型,在调节径流、改善气候、维护生物多样性和保持区域生态平衡等方面发挥着重要的作用(Keddy, 2010; 陈发虎等, 2019). 植被作为沼泽湿地生态系统重要的组成成分,是沼泽湿地生态系统固碳的基础(宋长春等, 2018). 沼泽植物通过吸收CO₂合成有机物,并将其储存在活的植物组织中,当植物死亡后,植物残体形成腐殖质和泥炭使得部分碳贮存于土壤碳库中(刘子刚, 2004). 在全球变化背景下,沼泽湿地植被固碳能力研究已成为全球碳循环研究重要内容之一(Camill等, 2001; Ewe等, 2006; Cook等, 2009; Kirwan和Mudd, 2012; Byrd等, 2018; 王伯炜等, 2019; 郭斌等, 2020). 作为沼泽湿地生态系统重要的质量参数之一,植被地上生物量是估算沼泽植被碳储量的重要指标,同时也是研究沼泽湿地固碳量的基础. 明确沼泽植被地上生物量,可以为评估沼泽湿地对气候的调节作用提供科学依据,并为制定沼泽湿地生态系统适应性管理策略提供决策支持.

中国沼泽湿地面积在世界排名第三(Shen等, 2020),其中草本沼泽在所有沼泽湿地类型中分布最为广泛(陈克林, 2010). 已有研究表明,草本沼泽湿地植被较其他类型沼泽湿地的植被具有更高的固碳速率(Rocha和Goulden, 2009; 史小红等, 2015). 在中国草本沼泽植被生物量研究方面,在局域尺度上,已有许多学者对中国草本沼泽湿地分布区如闽江河口、洪湖、江苏盐城、黄河三角洲以及三沙湾等地的一种或几种草本沼泽植被地上生物量进行了分析(Zhang等, 2008; 刘

刚和陈利, 2013; 谭清梅等, 2013; 周在明等, 2016; 刘莉等, 2017); 在区域尺度上,也有一些学者对温带、寒温带等地区草本沼泽湿地植被生物量进行了研究(李建东和郑慧莹, 1997; 沈海花等, 2016; 李伟娜等, 2017); 在全国尺度上,许多学者对中国草地植被地上生物量进行了研究(朴世龙等, 2004; Ni, 2004; Piao等, 2007; 方精云等, 2007; 樊宝丽等, 2008),但上述研究分析的是中国草地植被,缺少对中国草本沼泽植被地上生物量的研究.

2013~2018年,在国家科技基础性工作专项“中国沼泽湿地资源及其主要生态环境效益综合调查”项目的支持下,来自中国科学院东北地理与农业生态研究所、东北师范大学、北京林业大学、国家林业和草原局调查规划设计院等12家单位的百余名科研人员对中国沼泽湿地资源进行了系统的调查. 这次调查涉及全国440片沼泽湿地的植物、水和泥炭资源及其生态效益状况,共设置了18390个调查样方,基本查清了中国沼泽湿地的情况,为中国沼泽湿地的保护及科学管理提供了重要的基础数据. 本次调查主要依据自然地理水热条件及地势地貌差异,将中国沼泽湿地分为温带湿润半湿润区、温带干旱半干旱区、亚热带湿润区、青藏高原区和滨海区五大沼泽湿地区,在3006个草本沼泽样方取样并实测了沼泽植被地上生物量,获得了中国目前调查面积最广、数据最为全面的草本沼泽植被数据集. 本文基于此次大规模调查获取的中国草本沼泽植被地上生物量实测数据集,首次对全国尺度的草本沼泽植被地上生物量及其时空分布进行了分析.

2 研究区概况

草本沼泽是地表及地表下层土壤经常过度湿润,主要生长着水生和沼生草本植物的沼泽(Gong等,

2020). 中国草本沼泽从沿海到内陆、从热带到寒温带均有分布, 根据自然地理条件及地势地貌差异, 可将中国草本沼泽划分为五个分布区: 温带湿润半湿润区、温带干旱半干旱区、青藏高原区、亚热带湿润区、滨海沼泽区(图1). 温带湿润半湿润区主要包括东北三省、内蒙古东北部、河北、天津、山东、河南和陕西等地, 气候条件以温带季风气候和温带大陆性气候为主, 温带湿润半湿润区北部的气候特点是冬季寒冷干燥, 夏季温暖多雨(刘琼玉, 2019), 草本沼泽植物以小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)、藁草(*Carex* spp.)、芦苇(*Phragmites australis*)等为主; 温带湿润半湿润区南部的降水偏少, 夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥, 春、秋短促, 该地区的草本沼泽植物的优势种主要有荆三棱(*Bolboschoenus yagara*)、四角刻叶菱(*Trapa incisa*)、荇菜(*Nymphoides peltata*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)等. 温带干旱半干旱区主要包括内蒙古、新疆、甘肃、宁夏、山西和陕西的部分地区, 主要气候特点表现为降水少且季节分配不均, 冬季寒冷而夏季炎热, 气温年较差和日较差较大(王英麟, 1992), 该区草本沼泽植物主要优势种为芦苇、碱蓬(*Suaeda glauca*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、华扁穗草(*Blysmus sino-compressus*)、高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)等. 青藏高原区主要包括西藏、青海和四川西北部, 该区平均海拔4000m以上, 辐射强烈, 气温较低, 冬季干冷漫长, 夏季温凉多雨(杨元合和朴世龙, 2006), 该区草本沼泽植物优势种主要有藏北嵩草(*Kobresia littledalei*)、华扁穗草、芦苇等. 亚热带湿润区主要包括安徽、湖北、湖南、重庆、云南、重庆、浙江等约13个省及直辖市, 该区气候四季分明, 夏季高温多雨, 冬季温和湿润, 沼泽湿地植物主要包括水蓼(*Polygonum hydropiper*)、南荻(*Miscanthus lutarioriparius*)、菰(*Zizania latifolia*)等. 滨海区主要包括海岛和沿海陆地等地区, 气候属于海洋性气候, 冬暖夏凉, 气温年内变化较同纬度内陆地区小, 该区主要草本沼泽植物的优势种有互花米草(*Spartina alterniflora*)、芦苇、茭苳(*Cyperus malaccensis*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)等.

3 数据与方法

3.1 数据来源

全国草本沼泽分布信息来源于国家地球系统科学

图1 中国草本沼泽植被分布及其地上生物量调查样点

数据中心提供的全国沼泽湿地现状分布数据集(<http://www.geodata.cn/>). 该数据集利用美国Landsat卫星、中巴资源卫星和中国环境卫星等中高分辨率遥感影像作为主要数据源, 通过建立沼泽湿地分类系统, 结合沼泽湿地调查规范与标准, 对中国沼泽湿地分布信息进行了高精度解译. 该数据集已采用遥感技术和地面验证相结合的方法, 对数据进行人机交互判别解译, 并通过了野外准确性验证(Shen等, 2019). 本文利用的草本沼泽数据集为2013~2017年草本沼泽实地调查数据, 涵盖220种群落类型(网络版附图1, <http://earthcn.scichina.com>), 数据包括实地调查点的经纬度、海拔、地貌、土壤、积水等情况, 植物群落的盖度、高度、多度、植株密度、地上生物量湿重和干重、人为干扰情况等. 根据中国草本沼泽湿地斑块的分布, 项目总共选取了1002个调查样点, 每个样点设置了3个1m×1m的重复样方, 调查人员将植被地上部分贴地面割下, 清除附着的砾石、土壤等杂物后带回, 在实验室65℃条件下烘干至恒重并进行称重, 获得各调查样点的植被地上生物量数据. 草本沼泽植被地上生物量实测数据, 是目前中国调查面积最广、数据量最多的草本沼泽湿地植物数据集. 在中国五个沼泽湿地区, 所调查的草本沼泽植物样方数、群落数以及代表性植物群落信息如表1所示. 参照以往研究关于中国草地植物生物量与碳的常用转换系数(方精云等, 2007), 本文利用0.45的转

表 1 中国草本沼泽植物群落调查信息

区域	样方个数 (1m×1m)	群落个数	主要植物群落
滨海沼泽区	374	29	芦苇(<i>Phragmites australis</i>)、互花米草(<i>Spartina alterniflora</i>)、茭草(<i>Cyperus malaccensis</i>)、盐地碱蓬(<i>Suaeda salsa</i>)、海三棱藨草(<i>Scirpus mariqueter</i>)、芦苇(<i>Phragmites australis</i>)、盐地碱蓬(<i>Suaeda salsa</i>)、藨草(<i>Scirpus triqueter</i>)、碱蓬(<i>Suaeda glauca</i>)、南方碱蓬(<i>Suaeda australis</i>)、盐角草(<i>Salicornia europaea</i>)、互花米草(<i>Spartina alterniflora</i>)、狭叶香蒲(<i>Typha angustifolia</i>)、水莎草(<i>Cyperus serotinus</i>)、藨草(<i>Scirpus triqueter</i>)、辽宁碱蓬(<i>Suaeda liaotungensis</i>)等
亚热带湿润沼泽区	532	76	芦苇(<i>Phragmites australis</i>)、荇菜(<i>Nymphoides peltata</i>)、水蓼(<i>Polygonum hydropiper</i>)、菰(<i>Zizania latifolia</i>)、藨草(<i>Carex</i> spp.)、南荻(<i>Miscanthus lutarioriparius</i>)、茭草(<i>Cyperus malaccensis</i>)、荻(<i>Miscanthus sacchariflorus</i>)、藨草(<i>Phalaris arundinacea</i>)、四角刻叶菱(<i>Trapa incisa</i>)、苦草(<i>Vallisneria spiralis</i>)、喜旱莲子草(<i>Alternanthera philoxeroides</i>)、马来眼子菜(<i>Potamogeton wrightii</i>)、细果野菱(<i>Trapa maximowiczii</i>)、黑藻(<i>Hydrilla verticillata</i>)、灰化藨草(<i>Carex cinerascens</i>)、互花米草(<i>Spartina alterniflora</i>)、金鱼藻(<i>Ceratophyllum demersum</i>)、具刚毛荸荠(<i>Eleocharis valleculosa</i>)、荆三棱(<i>Bolboschoenus yagara</i>)等
青藏高原沼泽区	499	80	藏北嵩草(<i>Kobresia littledalei</i>)、芦苇(<i>Phragmites australis</i>)、西藏嵩草(<i>Kobresia tibetica</i>)、藏北嵩草(<i>Kobresia littledalei</i>)、华扁穗草(<i>Blysmus sinocompressus</i>)、华扁穗草(<i>Blysmus sinocompressus</i>)、藏北嵩草(<i>Kobresia littledalei</i>)、高山藨草(<i>Carex pseudosupina</i>)、杉叶藻(<i>Hippuris vulgaris</i>)、海韭菜(<i>Triglochin maritima</i>)、圆囊藨草(<i>Carex orbicularis</i>)、西藏嵩草(<i>Kobresia tibetica</i>)、华扁穗草(<i>Blysmus sinocompressus</i>)、嵩草(<i>Kobresia myosuroides</i>)、卵穗荸荠(<i>Heleocharis soloniensis</i>)、水葱(<i>Schoenoplectus tabernaemontani</i>)、藏西嵩草(<i>Kobresia deasyi</i>)、水蓼(<i>Polygonum hydropiper</i>)、青藏藨草(<i>Carex moorcroftii</i>)等
温带干旱半干旱沼泽区	664	104	芦苇(<i>Phragmites australis</i>)、莎草(<i>Cyperus</i> spp.)、藨草(<i>Carex</i> spp.)、紫羊茅(<i>Festuca rubra</i>)、藨草(<i>Scirpus triqueter</i>)、莎草(<i>Cyperus</i> spp.)、芦苇(<i>Phragmites australis</i>)、莎草(<i>Cyperus</i> spp.)、三棱草(<i>Pinellia ternata</i>)、委陵菜(<i>Potentilla chinensis</i>)、车前(<i>Plantago asiatica</i>)、华扁穗草(<i>Blysmus sinocompressus</i>)、藨草(<i>Carex</i> spp.)、赖草(<i>Leymus secalinus</i>)、碱蓬(<i>Suaeda glauca</i>)、高山嵩草(<i>Kobresia pygmaea</i>)、垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i>)、藨草(<i>Carex</i> spp.)、盐角草(<i>Salicornia europaea</i>)、芦苇(<i>Phragmites australis</i>)、赖草(<i>Leymus secalinus</i>)、芦苇(<i>Phragmites australis</i>)、盐角草(<i>Salicornia europaea</i>)、藜(<i>Chenopodium album</i>)、针茅(<i>Stipa capillata</i>)、假苇拂子茅(<i>Calamagrostis pseudophragmites</i>)等
温带湿润半湿润沼泽区	937	46	碱蓬(<i>Suaeda glauca</i>)、芦苇(<i>Phragmites australis</i>)、藨草(<i>Carex</i> spp.)、小叶章(<i>Deyeuxia angustifolia</i>)、扁秆藨草(<i>Scirpus planiculmis</i>)、小叶章(<i>Deyeuxia angustifolia</i>)、藨草(<i>Carex</i> spp.)、碱蓬(<i>Suaeda glauca</i>)、芦苇(<i>Phragmites australis</i>)、香蒲(<i>Typha orientalis</i>)、狭叶香蒲(<i>Typha angustifolia</i>)、藨草(<i>Carex</i> spp.)、莎草(<i>Cyperus</i> spp.)、藨草(<i>Carex</i> spp.)、芦苇(<i>Phragmites australis</i>)、藨草(<i>Carex</i> spp.)、大叶章(<i>Deyeuxia purpurea</i>)等

换系数将中国草本沼泽植物地上生物量(单位为g)转换成碳量(g C).

为准确提取中国草本沼泽植被的分布, 本文利用了2013~2017年MOD13Q1归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)数据集(<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), 该数据集由美国国家航空航天局提供, 时间分辨率为16天, 空间分辨率为250m. 此外, 本文利用由中国国家气象科学数据中心提供的2013~2017年全国范围内609个气象站点(<http://data.cma.cn/>)的逐月气温和降水数据来分析中国草本沼泽湿地对应的水热条件. 此外本文利用气温和降水数据计算了标准化降水蒸散指数(standardized precipi-

tation evapotranspiration index, SPEI), 来分析中国草本沼泽湿地的综合水热条件(Vicente-Serrano等, 2010), SPEI值越小表示干旱程度越高, SPEI值越大表示越湿润(Tomas-Burguera等, 2020).

3.2 方法

本文利用最大值合成法将逐旬NDVI数据合成为逐月NDVI数据, 以消除大气、云、太阳高度角等不确定因素的影响(Holben, 1986; 神祥金等, 2015), 然后计算逐像元5~9月NDVI值平均值得到生长季NDVI值, 并将草本沼泽分布范围内2013~2017年多年平均生长季NDVI≤0的所有像元对应的区域剔除, 得到中国草本

沼泽植被实际分布范围。在植被生物量数据处理方面, 本文首先对实测数据进行预处理, 删掉少量异常值, 并将同一调查样点的各重复样方(1m×1m)的生物量值求平均值, 得到每个调查样点的地上生物量平均密度(单位面积地上生物量, 单位为 g C m^{-2}), 最终共得到985个调查样点的草本沼泽植被地上生物量平均密度值。其次, 将预处理后的草本沼泽植被地上生物量密度实测数据集生成生物量数据库。已有大量研究表明, 中国草地植被地上生物量与归一化植被指数NDVI年最大值具有很好的相关性, 生物量随着植被指数升高而增加(朴世龙等, 2004; 方精云等, 2007)。基于此, 我们分析并建立了植被指数NDVI与中国草本沼泽植被实测地上生物量的关系和经验方程, 并未得出明显的相关性和理想的经验方程。分析其原因可能是因为沼泽植被是非地带性植被, 植被分布不连续, 且由于诸多广布种(如生物量较高的芦苇等)的存在及复杂的植被淹水状况, 使得实测生物量与一定范围内的遥感植被指数无明显相关性。由于本次全国大规模的沼泽湿地基础性调查在选取调查样点和设置样方时, 全面考虑了中国草本沼泽斑块分布及斑块内植被的平均状况, 因此本文运用在植被生物量空间插值上常用的普通克里格插值方法(Le和James, 2006; 刘晓梅等, 2011)将样点生物量值在中国草本沼泽植被分布范围内进行插值, 得到的中国草本沼泽植被地上生物量空间分布结果。本文将中国及五个沼泽分布区范围内所有草本沼泽植被像元对应的地上生物量密度的平均值, 作为整个中国及五个沼泽区植被地上生物量平均密度值。

4 结果

根据草本沼泽分布数据, 中国草本沼泽总面积约为 $9.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ (表2)。植被地上生物量分析结果表明, 中国草本沼泽植被地上生物量平均密度约为 $(227.5 \pm 23.0) \text{ g C m}^{-2}$ (95%置信区间, 下同), 全国草本沼泽植被总地上生物量约为 $(22.2 \pm 2.2) \text{ Tg C}$ 。在空间上, 中国草本沼泽植被地上生物量密度范围为 $12 \sim 1400 \text{ g C m}^{-2}$, 呈现出东北和青藏高原地区低, 华北中部和滨海地区高的特征(图2)。中国草本沼泽植被地上生物量密度的低值区主要分布在气温较低的大兴安岭北部、内蒙古东北部以及青藏高原西南部等地区, 地上生物量密度低于 100 g C m^{-2} , 这些地区草本沼泽植被多为混交群

图2 中国草本沼泽植被地上生物量空间分布格局

落, 如委陵菜+车前群落、西藏嵩草+华扁穗草群落、西藏嵩草+委陵菜群落等; 中国草本沼泽植被地上生物量密度最高的地区位于华北中部以及滨海等地区, 植被地上生物量密度可达 $1000 \sim 1400 \text{ g C m}^{-2}$, 这些地区的主要草本沼泽植物类型为芦苇、香蒲、盐地碱蓬等(网络版附图1)。

为进一步分析中国草本沼泽植被地上生物量空间差异, 我们对比分析了中国五个草本沼泽分布区的植被地上生物量, 结果表明: 不同沼泽区草本沼泽植被地上生物量密度从小到大依次为温带湿润半湿润沼泽区 $((182.3 \pm 49.3) \text{ g C m}^{-2})$ < 青藏高原沼泽区 $((243.9 \pm 26.6) \text{ g C m}^{-2})$ < 温带干旱半干旱沼泽区 $((300.5 \pm 73.2) \text{ g C m}^{-2})$ < 亚热带湿润沼泽区 $((348.4 \pm 59.0) \text{ g C m}^{-2})$ < 滨海沼泽区 $((675.4 \pm 73.8) \text{ g C m}^{-2})$; 植被地上总生物量从小到大依次为滨海沼泽区 $((1.1 \pm 0.1) \text{ Tg C})$ < 亚热带湿润沼泽区 $((1.2 \pm 0.2) \text{ Tg C})$ < 青藏高原沼泽区 $((3.6 \pm 0.4) \text{ Tg C})$ < 温带干旱半干旱沼泽区 $((7.6 \pm 1.8) \text{ Tg C})$ < 温带湿润半湿润沼泽区 $((9.6 \pm 2.6) \text{ Tg C})$ 。草本沼泽植被总地上生物量与草本沼泽面积和植被地上生物量密度有关, 尽管温带湿润半湿润沼泽区草本沼泽植被地上生物量平均密度最低, 但其草本沼泽面积 $(5.3 \times 10^4 \text{ km}^2)$ 在五个沼泽分布区中最大, 从而导致温带湿润半湿润沼泽区草本沼泽植被总地上生物量最大; 同样尽管滨海沼泽区

表 2 中国草本沼泽面积及植被地上生物量

区域	草本沼泽面积(km ²)	植被地上生物量平均密度(g C m ⁻²)	植被地上生物量(Tg)	植被地上生物量(Tg C)
全国	97380.1	227.5±23.0	49.2±4.9	22.2±2.2
滨海沼泽区	1614.1	675.4±73.8	2.4±0.2	1.1±0.1
亚热带湿润沼泽区	3339.6	348.4±59.0	2.6±0.4	1.2±0.2
青藏高原沼泽区	14552.7	243.9±26.6	7.9±0.9	3.6±0.4
温带干旱半干旱沼泽区	25201.3	300.5±73.2	16.8±4.0	7.6±1.8
温带湿润半湿润沼泽区	52672.4	182.3±49.3	21.3±5.8	9.6±2.6

草本沼泽植被地上生物量平均密度最大,但由于其草本沼泽面积($0.2 \times 10^4 \text{ km}^2$)在五个沼泽分布区中最小,因此滨海草本沼泽植被总地上生物量最小。

5 讨论

由于缺少大规模的实地调查数据,目前关于全国尺度的中国草本沼泽植被地上生物量的相关研究尚未见报道(郑姚闽等, 2013)。本研究利用全国沼泽湿地植被调查数据和沼泽湿地分布数据,通过将野外调查与遥感技术相结合,首次从全国尺度对中国草本沼泽植被地上生物量进行了分析。本文得出中国草本沼泽植被地上生物量平均密度为 227.5 g C m^{-2} ,该结果低于颜韦(2017)估算得出的中国湿地生态系统的地上生物量密度值(962.1 g C m^{-2}),但高于Ni(2004)和方精云等(2007)估算出的中国草地植被地上生物量密度(55.4 和 45 g C m^{-2})(表3)。分析其原因可能是由于颜韦(2017)的研究对象为所有湿地生态系统,涵盖了滨海湿地、湖泊、河流、沼泽等各种类型的湿地,而本文的研究对象为草本沼泽,其植被地上生物量较其他湿地类型一般要小的缘故;而Ni(2004)和方精云等(2007)的研究对象为草地植被,包含了大面积的荒漠草原、高寒草原等草地类型,且这些类型的草原植被生物量一般要低于草本沼泽植被生物量(李传华等, 2020),从而解释了本文结果与Ni(2004)、方精云等(2007)研究结果的差异。

本文研究结果表明,中国草本沼泽植被地上生物量在空间上具有明显的差异(图2)。中国草本沼泽植被地上生物量密度较小的地区位于温带湿润半湿润区北部和青藏高原区南部,寒冷恶劣的自然环境条件可能是导致这些地区沼泽植被生物量较小的主要原因(Shen等, 2019)。在温带湿润半湿润沼泽区,草本沼泽

植被地上生物量平均密度为 182.3 g C m^{-2} ,这与Shan等(2020)估算出的东北三江平原草本沼泽植被地上生物量(167 g C m^{-2})相近;在青藏高原沼泽区,植被地上生物量平均密度为 243.9 g C m^{-2} ,这与沈海花估算的高寒草本沼泽植被的地上生物量密度(162.8 g C m^{-2})以及李伟娜得出的三江源高山草甸沼泽植被的地上生物量密度(201.0 g C m^{-2})较为相近(沈海花等, 2016; 李伟娜等, 2017)。中国草本沼泽植被地上生物量密度的高值区主要分布在滨海沼泽区和温带沼泽区,其中滨海沼泽区草本沼泽植被地上生物量平均密度为 675.4 g C m^{-2} ,这与Zhang等(2008)得出的闽江河口草本沼泽的地上生物量(686.2 g C m^{-2})结果基本一致。由于滨海湿地主要优势物种为生物量较高的芦苇、互花米草等(邓自发等, 2006)(网络版附图1),这在一定程度上导致滨海沼泽区植被地上生物量密度较高。本文得出中国温带草本沼泽植被地上生物量平均密度为 217.7 g C m^{-2} ,这与沈海花等(2016)得出中国寒温带/温带草本沼泽植被的地上生物量密度(231.1 g C m^{-2})较为相近。温带沼泽区草本沼泽地上生物量平均密度较大,这可能与新疆的塔城和伊犁、内蒙古呼伦贝尔,辽河三角洲等地区是我国主要的芦苇分布区有关(闫明等, 2010)。在亚热带湿润沼泽区,吴桂平等(2015)以鄱阳湖自然保护区为研究对象,采用MODIS植被指数与实测数据相结合的方法得出的湿地植被地上生物量(597.1 g C m^{-2})高于本文得出的亚热带湿润区草本沼泽植被地上生物量(348.4 g C m^{-2}),而沈国状等(2009)得出鄱阳湖草本沼泽植被地上部分的生物量为 313.7 g C m^{-2} ,与本研究结果较为接近。

沼泽湿地的分布具有明显的非地带性特征,同时也呈现出一定的地带性规律。植物作为沼泽生态系统的重要组成部分,其物种分布同样在非地带性特征基础上

表 3 中国草本沼泽、湿地及草地植被地上生物量密度比较

区域	植被类型	植被地上生物量平均密度 (g C m ⁻²)	资料来源
全国	中国草本沼泽	227.5	本文研究
	中国湿地生态系统(包括近海湿地、湖泊、河流、 水库和沼泽等湿地类型)	962.1	颜韦, 2017
	中国草地植被	119.0	樊宝丽等, 2008
	中国草地植被	44.1	朴世龙等, 2004
	中国草地植被	55.4	Ni, 2004
	中国草地植被	45	方精云等, 2007
	中国草地植被	43.5	Piao等, 2007
寒温带/温带	中国温带草本沼泽	217.7	本文研究
	中国温带干旱半干旱草本沼泽	300.5	本文研究
	中国寒温带/温带草本沼泽	231.1	沈海花等, 2016
	高寒草本沼泽	162.8	沈海花等, 2016
	中国温带草甸及沼泽植被	370	李建东和郑慧莹, 1997
温带湿润半湿润	中国温带湿润半湿润草本沼泽	182.3	本文研究
	三江平原沼泽湿地	152~271	马学慧等, 1996
	东北三江平原草本沼泽	167	Shan等, 2020
	洪河湿地(小叶章草甸、沼泽和岛状林)	420.6	韩颖等, 2014
	黄河三角洲草本沼泽(芦苇、碱蓬)	0~1214.1	刘莉等, 2017
亚热带湿润	中国亚热带湿润草本沼泽	348.4	本文研究
	闽江河口湿地芦苇	686.2	张林海等, 2008
	鄱阳湖湖草地上部分	313.7	沈国状等, 2009
	鄱阳湖自然保护区湿地植被	0~630.9	吴桂平等, 2015
滨海	中国滨海草本沼泽	675.4	本文研究
	长江口九段浅滩湿地(互花米草)	200.6	Liu等, 2013
	江苏盐城滨海湿地(芦苇、碱蓬、米草)	450~1350	谭清梅等, 2013
青藏高原	中国青藏高原草本沼泽	243.9	本文研究
	三江源草甸沼泽	201.0	李伟娜等, 2017

隐含一定的地带性规律(赵魁义, 1999). 为进一步分析不同地区草本沼泽植被生物量与环境因子的关系, 我们对比分析了中国不同沼泽分布区草本沼泽植被地上生物量与水分条件和海拔的关系. 在亚热带湿润沼泽区和滨海沼泽区, 植被地上生物量与水分条件和海拔等无明显的相关性, 这可能是由于亚热带湿润半湿润区和滨海沼泽区的水分条件较好, 适宜植被生长, 水分条件不是沼泽植被生长的限制因子, 因此这些地区草本沼泽植物非地带性特征更加明显, 例如亚热带湿润半湿润区沼泽植被生物量较大地区集中在云南大理、江苏兴化等芦苇分布区(图2). 由于芦苇属于广布

种(网络版附图1), 地上生物量较大, 导致生物量分布非地带性特征更为明显. 在青藏高原地区, 草本沼泽植被地上生物量与海拔高度呈显著相关性, 草本沼泽生物量随着海拔的升高而下降(图3a). 已有研究表明, 在青藏高原地区随着海拔的升高, 气温降低, 环境更加恶劣, 资源有效性降低(苏梅等, 2009), 植物获取最大光合能量的能力下降(樊宝丽等, 2008), 进而导致高海拔地区植被地上生物量较小(罗天祥等, 2002). 在青藏高原沼泽区, 草本沼泽植被地上生物量密度最小的区域位于西南部(图2), 该地区草本沼泽植物(主要包括西藏嵩草、华扁穗草等)的平均株高为0.12m, 平均

图3 中国草本沼泽植被地上生物量与环境因素的关系

密度不超过20株/m²。青藏高原西南部较高的海拔可能是导致该地区草本沼泽植被地上生物量较小的原因,此外青藏高原西南部沼泽湿地大多分布在牧区,这些地区由于大力发展畜牧业,人类活动对沼泽湿地植被的干扰较青藏高原其他地区更为严重(张海朋等, 2019),这可能也是导致该地区草本沼泽植被生物量较低的另一原因。沼泽植被遭受破坏后,会影响沼泽生态系统的固碳功能及生态环境,为进一步加强区域沼泽湿地的保护,政府在制定湿地保护政策的同时,还应提高当地群众的湿地保护意识,最大程度减少放牧等人类活动的干扰,有效维护沼泽湿地的功能及其生态环境。

在温带干旱半干旱地区和温带湿润半湿润地区,草本沼泽植被地上生物量与SPEI呈显著相关性,随着干旱程度的增加,草本沼泽植被地上生物量先降低后趋于平缓(图3b, 3c)。这一结论与陈效逖和郑婷(2008)得出的中国温带草原地上生物量与干燥度呈显著相关性,地上生物量随干旱程度的增加先降低后平缓的结论一致,分析其原因可能是因为随着干旱程度的加剧,

温带地区土壤水分有效性降低,从而使植被地上生物量降低(陈效逖和郑婷, 2008)。在温带湿润半湿润地区,草本沼泽植被地上生物量与气温呈显著相关性,草本沼泽植被地上生物量在年均温越高的地区相对越大(图3d)。温带湿润半湿润沼泽区草本沼泽植被地上生物量密度最低的区域主要位于气候最为寒冷的黑龙江省北部地区,其草本沼泽植被地上生物量平均密度低于30g C m⁻²。该区域植被地上生物量密度较低的主要原因是由于在寒冷地区,气候等环境条件恶劣,草本植物生长矮小、覆盖度低的缘故(Shen等, 2019)。本文研究结果发现,温带湿润半湿润区松嫩平原的草本沼泽植被地上生物量(300~500g C m⁻²)要明显高于周边地区,且高于中国草本沼泽植被地上生物量的平均值(227.5g C m⁻²)(图2)。2005年全国第一个湿地保护条例《黑龙江省草原条例》公布,规定自2006年1月1日起松嫩平原全面禁止放牧,松嫩平原沼泽湿地受到了良好的保护。已有研究发现松嫩平原沼泽湿地植被总体覆盖度在过去近20年呈现显著的上升,其原因可能与松嫩平原地区开展的湿地保护有密切的关系(Wang等,

2020). 在松嫩平原地区, 陈继红等(1998)得出2000年之前松嫩平原碱蓬地上生物量平均密度为 38.1g C m^{-2} , 要明显低于本次调查得出的碱蓬地上生物量平均密度(70.2g C m^{-2}). 因此, 本文关于松嫩平原草本沼泽植被地上生物量的结果可能进一步证实了松嫩平原湿地保护政策已取得了很好的成效. 沼泽湿地植被的保护和恢复不仅有利于维持湿地生态系统的稳定, 还能对减缓气候变暖等生态功能产生重要的影响. 因此, 在我国湿地大面积退化背景下, 各级政府及相关部门还应继续积极推动湿地保护工作, 全面提升全社会湿地保护意识, 实现对湿地生态系统的科学管理, 进而为我国生态安全和社会经济可持续发展提供重要保障.

6 结论

本文利用实地调查数据首次从全国尺度对中国草本沼泽植被地上生物量进行了全面分析, 研究得出中国草本沼泽植被总地上生物量为 $(22.2\pm 2.2)\text{Tg C}$, 地上生物量平均密度为 $(227.5\pm 23.0)\text{g C m}^{-2}$, 沼泽植被生物量密度较小的区域主要在东北和青藏高原地区, 沼泽植被生物量密度较大的区域主要在华北中部和滨海地区. 不同沼泽分布区草本沼泽植被地上生物量不同, 其中温带湿润半湿润草本沼泽植被地上总生物量在五个区中最大, 但植被地上生物量平均密度最小, 其生物量平均密度为 $(182.3\pm 49.3)\text{g C m}^{-2}$; 滨海沼泽区草本沼泽植被地上生物量平均密度最大, 平均密度为 $(675.4\pm 73.8)\text{g C m}^{-2}$, 但由于该地区的面积较小, 其植被总地上生物量在五个分区中最小. 中国草本沼泽植被地上生物量空间分布具有明显的非地带性特征, 但在部分地区也呈现出一定的地带性规律. 例如, 在青藏高原地区, 草本沼泽植被地上生物量总体随海拔的升高而降低; 在温带湿润半湿润区和温带干旱半干旱区, 草本沼泽植被地上生物量随干旱程度的增加先降低后趋于平缓; 而在温带湿润半湿润地区, 草本沼泽植被地上生物量在温度越高的地区相对越大.

本文目前的研究可能存在一定的不确定性. 首先, 在沼泽植被调查时, 虽然选取的调查样点较多, 但受野外调查时间、人力、物力等的限制, 调查样点仍无法涵盖中国所有草本沼泽分布地区, 因此样点的分布可能对本文的生物量结果带来一定的不确定性. 此外, 利用插值方法估算沼泽植被地上生物量存在一定的不

足, 针对草本沼泽这种不连续分布的植被类型, 简单的空间插值效果可能并不理想, 且无法完全排除生物量的自相关问题, 未来需进一步探索大尺度沼泽湿地植被生物量的准确估算方法. 鉴于沼泽湿地分布是动态化的, 未来还需进一步加强水文模型和气象数据等相结合的方法来进行湿地制图, 并在未来发展高分辨率湿地制图的同时, 加强对湿地制图自动算法的探索和应用(宫鹏等, 2016). 由于当前地表覆盖数据产品中湿地分类的准确性相对较差(宫鹏等, 2010; Gong等, 2013), 且有关湿地植物物种分布的制图相对较少, 未来研究需进一步加强高精度湿地植被遥感制图及地面验证工作. 此外, 本文目前只分析了中国草本沼泽的地上生物量, 而沼泽植被地下生物量也是极为重要的碳库, 因此未来还需进一步对中国沼泽植被地下生物量的动态变化及影响因子进行研究.

参考文献

- 陈发虎, 傅伯杰, 夏军, 吴铎, 吴绍洪, 张锦锂, 孙航, 刘禹, 方小敏, 秦伯强, 李新, 张廷军, 刘宝元, 董治宝, 侯书贵, 田立德, 徐柏青, 董广辉, 郑景云, 杨威, 王鑫, 李再军, 王飞, 胡振波, 王杰, 刘建宝, 陈建徽, 黄伟, 侯居峙, 蔡秋芳, 隆浩, 姜明, 胡亚鲜, 冯晓明, 莫兴国, 杨晓燕, 张东菊, 王秀红, 尹云鹤, 刘晓晨. 2019. 近70年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望. 中国科学: 地球科学, 49: 1659-1696
- 陈继红, 祖元刚, 倪红伟, 王昆. 1998. 松嫩草原放牧地主要植物群落地上生物量的增长规律. 东北林业大学学报, 26: 49-52
- 陈克林. 2010. 中国的湿地. 生物学通报, 45: 1-3
- 陈效述, 郑婷. 2008. 内蒙古典型草原地上生物量的空间格局及其气候成因分析. 地理科学, 28: 369-374
- 邓自发, 安树青, 智颖颀, 周长芳, 陈琳, 赵聪蛟, 方淑波, 李红丽. 2006. 外来种互花米草入侵模式与爆发机制. 生态学报, 26: 2678-2686
- 樊宝丽, 孟金柳, 赵志刚, 杜国祯. 2008. 海拔对青藏高原东部毛茛科植物繁殖特征和资源分配的影响. 西北植物学报, 28: 805-811
- 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 2007. 1981-2000年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学D辑: 地球科学, 37: 804-812
- 宫鹏, 牛振国, 程晓, 赵魁义, 周德民, 魏建宏, 梁璐, 王晓风, 李丹丹, 黄华兵, 王毅, 王坤, 李文宁, 王显威, 应清, 杨镇钟, 叶玉芳, 李展, 庄大方, 迟耀斌, 周会珍, 闫军. 2010. 中国1990和2000基准年湿地变化遥感. 中国科学: 地球科学, 40: 768-775
- 宫鹏, 张伟, 俞乐, 李丛丛, 王杰, 梁璐, 李雪草, 计璐艳, 白玉琪. 2016. 全球地表覆盖制图研究新范式. 遥感学报, 20: 1002-1016
- 郭斌, 王珊, 王明田. 2020. 1999-2015年若尔盖草原湿地净初级生产

- 力时空变化. 应用生态学报, 31: 424–432
- 韩颖, 裴亮, 杜嘉. 2014. 洪河湿地植被地上生物量遥感反演研究. 遥感技术与应用, 29: 224–231
- 李传华, 孙皓, 王玉涛, 曹红娟, 殷欢欢, 周敏, 朱同斌. 2020. 基于机器学习估算青藏高原多年冻土区草地净初级生产力. 生态学杂志, 39: 1734–1744
- 李建东, 郑慧莹. 1997. 松嫩平原盐碱化草地治理及其生物生态机理. 北京: 科学出版社
- 李伟娜, 韦玮, 张怀清, 刘华. 2017. 基于多角度高光谱数据的高寒沼泽湿地植被生物量估算. 遥感技术与应用, 32: 809–817
- 刘刚, 陈利. 2013. 洪湖湿地碳储量的研究. 中南林业科技大学学报, 33: 103–107
- 刘莉, 韩美, 刘玉斌, 潘彬. 2017. 黄河三角洲自然保护区湿地植被生物量空间分布及其影响因素. 生态学报, 37: 4346–4355
- 刘琼玉. 2019. 中温带湿润和半湿润区景观动态多尺度分析. 硕士学位论文. 沈阳: 沈阳大学. 1–68
- 刘晓梅, 布仁仓, 邓华卫, 胡远满, 刘志华, 吴志伟. 2011. 基于地统计学丰林自然保护区森林生物量估测及空间格局分析. 生态学报, 31: 4783–4790
- 刘子刚. 2004. 湿地生态系统碳储存和温室气体排放研究. 地理科学, 24: 634–639
- 罗天祥, 石培礼, 罗辑, 欧阳华. 2002. 青藏高原植被样带地上部分生物量的分布格局. 植物生态学报, 26: 668–676
- 吕宪国. 2002. 湿地科学研究进展及研究方向. 中国科学院院刊, 17: 170–172
- 马学慧, 吕宪国, 杨青, 阎敏华. 1996. 三江平原沼泽地碳循环初探. 地理科学, 16: 323–330
- 朴世龙, 方精云, 贺金生, 肖玉. 2004. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 28: 491–498
- 神祥金, 周道玮, 李飞, 张海艳. 2015. 中国草原区植被变化及其对气候变化的响应. 地理科学, 35: 622–629
- 沈国状, 廖静娟, 郭华东, 董磊. 2009. 基于ENVISAT ASAR数据的鄱阳湖湿地生物量反演研究. 高技术通讯, 19: 98–103
- 沈海花, 朱言坤, 赵霞, 耿晓庆, 高树琴, 方精云. 2016. 中国草地资源的现状分析. 科学通报, 61: 139–154
- 史小红, 赵胜男, 孙标, 吴用. 2015. 呼伦贝尔市湿地生态系统固碳量与碳汇潜力评估. 中国农村水利水电, (10): 26–30
- 宋长春, 宋艳宇, 王宪伟, 郭跃东, 孙丽, 张新厚. 2018. 气候变化下湿地生态系统碳、氮循环研究进展. 湿地科学, 16: 424–431
- 苏梅, 齐威, 阳敏, 杜国祯. 2009. 青藏高原东部大通翠雀花的花特征和繁殖分配的海拔差异. 兰州大学学报(自然科学版), 45: 61–65
- 谭清梅, 刘红玉, 张华兵, 王聪, 侯明行. 2013. 盐城海滨湿地植被地上生物量遥感估算研究. 自然资源学报, 28: 2044–2055
- 王伯炜, 牟长城, 王彪. 2019. 长白山原始针叶林沼泽湿地生态系统碳储量. 生态学报, 39: 3344–3354
- 王英麟. 1992. 中纬度干旱半干旱气候特征和区域差异. 河北师范大学学报(自然科学版), 16: 87–91
- 吴桂平, 叶春, 刘元波. 2015. 鄱阳湖自然保护区湿地植被生物量空间分布规律. 生态学报, 35: 361–369
- 闫明, 潘根兴, 李恋卿, 邹建文. 2010. 中国芦苇湿地生态系统固碳潜力探讨. 中国农学通报, 26: 320–323
- 颜书. 2017. 中国典型陆地生态系统的生物量分配及其影响因素分析. 硕士学位论文. 上海: 华东师范大学. 1–63
- 杨元合, 朴世龙. 2006. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. 植物生态学报, 30: 1–8
- 张海朋, 樊杰, 何仁伟, 刘汉初. 2019. 青藏高原高寒牧区聚落时空演化及驱动机制——以藏北那曲县为例. 地理科学, 39: 1642–1653
- 张林海, 曾从盛, 全川. 2008. 闽江河口湿地芦苇和互花米草生物量季节动态研究. 亚热带资源与环境学报, 3: 25–33
- 赵魁义. 1999. 中国沼泽志. 北京: 科学出版社. 1–28
- 郑姚闽, 牛振国, 宫鹏, 戴永久, 上官微. 2013. 湿地碳计量方法及中国湿地有机碳库初步估计. 科学通报, 58: 170–180
- 周在明, 杨燕明, 陈本清. 2016. 三沙湾滩涂互花米草地上生物量估算. 湿地科学, 14: 391–395
- Byrd K B, Ballanti L, Thomas N, Nguyen D, Holmquist J R, Simard M, Windham-Myers L. 2018. A remote sensing-based model of tidal marsh aboveground carbon stocks for the conterminous United States. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 139: 255–271
- Camill P, Lynch J A, Clark J S, Adams J B, Jordan B. 2001. Changes in biomass, aboveground net primary production, and peat accumulation following permafrost thaw in the boreal peatlands of Manitoba, Canada. *Ecosystems*, 4: 461–478
- Cook B D, Bolstad P V, Næsset E, Anderson R S, Garrigues S, Morissette J T, Nickeson J, Davis K J. 2009. Using lidar and quickbird data to model plant production and quantify uncertainties associated with wetland detection and land cover generalizations. *Remote Sens Environ*, 113: 2366–2379
- Ewe S M L, Gaiser E E, Childers D L, Iwaniec D, Rivera-Monroy V H, Twilley R R. 2006. Spatial and temporal patterns of aboveground net primary productivity (ANPP) along two freshwater-estuarine transects in the florida coastal everglades. *Hydrobiologia*, 569: 459–474
- Fan J W, Zhong H P, Harris W, Yu G R, Wang S Q, Hu Z M, Yue Y Z. 2008. Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above- and below-ground biomass. *Clim Change*, 86: 375–396
- Gong C, Song C C, Sun L, Zhang D, Zhang J, Liu X H. 2020. Response of methane emissions to litter input manipulation in a temperate freshwater marsh, Northeast China. *Ecol Indic*, 115: 106377
- Gong P, Wang J, Yu L, Zhao Y, Zhao Y, Liang L, Niu Z, Huang X, Fu H, Liu S, Li C, Li X, Fu W, Liu C, Xu Y, Wang X, Cheng Q, Hu L, Yao W, Zhang H, Zhu P, Zhao Z, Zhang H, Zheng Y, Ji L, Zhang Y,

- Chen H, Yan A, Guo J, Yu L, Wang L, Liu X, Shi T, Zhu M, Chen Y, Yang G, Tang P, Xu B, Giri C, Clinton N, Zhu Z, Chen J, Chen J. 2013. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: First mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *Int J Remote Sens*, 34: 2607–2654
- Holben B N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Int J Remote Sens*, 7: 1417–1434
- IPCC. 2019. Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. <https://www.ipcc.ch/srccl/download/>
- Keddy P A. 2010. Wetland Ecology: Principles and Conservation. Oxford: Cambridge University Press
- Kirwan M L, Mudd S M. 2012. Response of salt-marsh carbon accumulation to climate change. *Nature*, 489: 550–553
- Le N D, James V Z. 2006. Statistical Analysis of Environmental Space-Time Processes. Berlin: Springer Sci Bus Media. 101–134
- Liu Y, Li X Z, Yan Z Z, Chen X Z, Sun P Y. 2013. Biomass and carbon storage of *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* in Jiuduan Shoal Wetland of Yangtze Estuary, East China. *Chin J Appl Ecol*, 24: 2129–2134
- Ni J. 2004. Forage yield-based carbon storage in grasslands of China. *Clim Change*, 67: 237–246
- Piao S, Fang J, Zhou L, Tan K, Tao S. 2007. Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999. *Glob Biogeochem Cycle*, 21: 1–10
- Rocha A V, Goulden M L. 2009. Why is marsh productivity so high? New insights from eddy covariance and biomass measurements in a Typha marsh. *Agric For Meteorol*, 149: 159–168
- Shan L, Song C, Zhang X, Wang X, Luan Z. 2020. Responses of above-ground biomass, plant diversity, and dominant species to habitat change in a freshwater wetland of Northeast China. *Russ J Ecol*, 51: 57–63
- Shen X J, Liu B H, Jiang M, Lu X G. 2020. Marshland loss warms local land surface temperature in China. *Geophys Res Lett*, 47: e87648
- Shen X J, Xue Z S, Jiang M, Lu X G. 2019. Spatiotemporal change of vegetation coverage and its relationship with climate change in freshwater marshes of Northeast China. *Wetlands*, 39: 429–439
- Tomas-Burguera M, Vicente-Serrano S M, Pea-Angulo D, Domínguez-Castro F, Noguera I, Kenawy A E. 2020. Global characterization of the varying responses of the standardized precipitation evapotranspiration index to atmospheric evaporative demand. *J Geophys Res-Atmos*, 125: e33017
- Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J Clim*, 23: 1696–1718
- Wang Y J, Shen X J, Jiang M, Lu X G. 2020. Vegetation change and its response to climate change between 2000 and 2016 in marshes of the Songnen Plain, Northeast China. *Sustainability*, 12: 3569
- Zhang Y, Xu M, Chen H, Adams J. 2008. Global pattern of NPP to GPP ratio derived from MODIS data: Effects of ecosystem type, geographical location and climate. *Glob Ecol Biogeogr*, 18: 280–290

(责任编辑: 赵艳)