泥炭沼泽湿地研究的若干基本问题与研究简史

陈槐^{1,2*}, 吴宁¹, 王艳芬^{2,3†}, 杨刚⁴, 鞠佩君¹, 朱单¹, 何奕忻¹, 朱求安⁵, 高永恒¹, 刘欣蔚¹

1. 中国科学院成都生物研究所山地生态恢复与生物资源利用重点实验室, 成都 610041;

2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 西南科技大学生命科学与工程学院, 绵阳 621010;

5. 河海大学水文与水资源学院, 南京 210098

* 通讯作者, E-mail: chenhuai@cib.ac.cn

† 通讯作者, E-mail: yfwang@ucas.ac.cn

收稿日期: 2020-03-24; 收修改稿日期: 2020-07-18; 接受日期: 2020-08-18; 网络版发表日期: 2020-10-15

第二次青藏高原科学考察研究项目(编号: 2019QZKK0304)和中国科学院战略性先导科技专项A类项目(编号: XDA2005010404)资助

摘要 泥炭沼泽湿地是一种独特的生态系统, 因其巨大的碳储量备受关注. 关于泥炭沼泽湿地的文献记录可追溯到17世纪末, 中国学者对于泥炭沼泽湿地的关注始于20世纪40年代末. 随着对泥炭沼泽湿地研究的不断深入, 其研究态势和研究范式也随之改变. 文章通过对泥炭沼泽研究的专著和文献进行分析, 从学科发展的角度出发对沼泽湿地研究历史沿革与态势进行了初步整理, 主要概括为三个发展时期: 自然资源学导向时期、地学导向时期及生态学导向时期. 此外, 文章还梳理了泥炭沼泽的定义及界定标准, 概述了雨养与矿养泥炭沼泽的区别与演变, 分析了泥炭沼泽土壤分类现状, 探讨了泥炭沼泽面积估算及其不确定性. 发现各国对泥炭沼泽的界定标准由于资源禀赋不同而差异较大, 由矿养泥炭向雨养泥炭演替模式正在突破传统的认知; 泥炭地土壤分类趋于细化, 泥炭土壤分析方法更加专业; 现有泥炭沼泽面积的界定过度依赖于土壤有机质含量和泥炭厚度这两个指标. 在泥炭沼泽湿地研究进程中, 研究范畴更加宽泛, 研究方法日新月异, 对泥炭地的认知在广度和深度上进一步扩展.

关键词 泥炭地, 湿地, 沼泽土壤, 分类, 自然资源, 可持续发展

1 引言

沼泽一直被视为一种自然综合体, 直到1935年英国生态学家Tansley提出“生态系统”(Ecosystem)的概念(Tansley, 1935)和1944年前苏联生态学家苏卡切夫提出“生物地理群落”(Boigeocoenosis)的概念(阪口丰,

1983), 沼泽才被视为一种生态系统或生物地理群落被学术界逐渐认同. 泥炭沼泽由于有机物大量积累使其成为一类特殊的湿地生态系统, 长期以来得到了博物学家、地理学家、地植物学家、地质学家、水文学家、泥炭学家及生态学家等的广泛关注和深入研究. 早在公元46年, 古罗马百科全书式的作家老普林尼

中文引用格式: 陈槐, 吴宁, 王艳芬, 杨刚, 鞠佩君, 朱单, 何奕忻, 朱求安, 高永恒, 刘欣蔚. 2021. 泥炭沼泽湿地研究的若干基本问题与研究简史. 中国科学: 地球科学, 51(1): 15–26, doi: [10.1360/SSTe-2020-0073](https://doi.org/10.1360/SSTe-2020-0073)

英文引用格式: Chen H, Wu N, Wang Y, Yang G, Ju P, Zhu D, He Y, Zhu Q, Gao Y, Liu X. 2021. A historical overview about basic issues and studies of mires (in Chinese). *Scientia Sinica Terrae*, 51(1): 15–26, doi: [10.1360/SSTe-2020-0073](https://doi.org/10.1360/SSTe-2020-0073)

(Plinius)就记录了日耳曼人利用泥炭作为燃料(阪口丰, 1983), 最早关于泥炭沼泽的英文文献可追溯到17世纪末(King, 1685). 中国泥炭土的描述可追溯到20世纪30年代(梭颇等, 1936), 中国学者独立开展泥炭沼泽的研究肇始于20世纪40年代末50年代初(陈禹章, 1958; 林英, 1956). 过去泥炭沼泽或者泥炭地的研究多从资源利用的角度出发, 20世纪70年代全球性的能源危机掀起了泥炭利用和开发研究的热潮. 随着气候变化的加剧, 近几十年来越来越多的学者深入研究了泥炭沼泽湿地的大自然贡献(Nature's Contribution to People, NCPs)(Díaz等, 2018). 研究态势的改变伴随着研究范式的改变, 范式的改变势必带来研究范畴的变化和研究态势的重新梳理. 鉴于此, 本文拟从泥炭沼泽湿地研究的历史沿革及泥炭沼泽湿地若干问题进行初步阐释.

2 泥炭沼泽研究历史沿革与态势

泥炭地(泥炭沼泽)的描述和观察古已有之, 古罗马和中国的古籍均有记载. Overbeck(1963)将泥炭地的研究历史划分为四个时期. 在此基础上, 柴岫(1990)把中国泥炭沼泽泥炭地学研究分为三个阶段, 具有重要的参考价值. 总体而言, 18世纪中叶以前, 泥炭地的研究以观测和描述为主; 18世纪中叶到19世纪末, 人们对泥炭和泥炭地各个方面开展了详细的考察, 基础研究不断深入; 20世纪以来, 泥炭地研究蓬勃发展, 形成了系统的科学理论和方法学(Overbeck, 1963; 柴岫, 1990).

泥炭沼泽早期的研究源于人类对泥炭的利用和泥炭地的开发, 即将泥炭地和泥炭作为自然资源来研究, 我们称之为“自然资源学导向为主的时期”, 18世纪为鼎盛时期(图1). 16世纪, 泥炭开采在荷兰已极为盛行, 17世纪, 泥炭排水系统也日趋完善. 1658年, 世界上第一部论述泥炭地的专著《泥炭地专论》(*Tractatus de Turffis ceu Cespitibus Bituminosis*)在当时泥炭地农业和泥炭开采的中心荷兰罗格宁根出版(阪口丰, 1983). 17世纪末开始, 俄国泥炭开采也已发轫(博奇等, 1989). 到18世纪, 西欧各国泥炭沼泽地排水与开垦已日益盛行(阪口丰, 1983). 1729年, 《泥炭物性论》(*Dissertation Physica de Turfis*)出版, 进一步阐释了泥炭的形成原因. 因此, 到18世纪时, 关于泥炭、泥炭

地、泥炭沼泽的科学研究和应用研究已基本确立(阪口丰, 1983).

从19世纪开始, 对于泥炭和泥炭沼泽的开发利用进一步发展, 特别是将泥炭作为燃料和能源的研究进一步发展. 大量关于泥炭沼泽的文献发表, 研究的深度和广度进一步拓展, 开始从地学角度来研究泥炭沼泽, 我们称之为“地学导向为主的时期”. 20世纪到达鼎盛时期, 持续到70年代全球能源危机. 1806年, 法国地理学家卢克(de Luc)描述了湖泊的陆生化过程和沼泽植物的地理分布(Clements, 1916). 1810年, 英国人仑尼(Rennie)出版了《泥炭沼泽的自然历史与起源概论》(*Essays on the Natural History and Origin of Peat Moss*)一书, 是早期论著中较为详尽和全面的泥炭沼泽专著(Rennie, 1810). Dau(1823)也在这一时期认识到高位泥炭沼泽的降雨补给性. 19世纪后半期, 俄国泥炭沼泽研究也得到显著发展(阪口丰, 1983; 博奇等, 1989). 20世纪初, 德国学者明确提出从地学角度研究泥炭沼泽的重要性和必要性, 其中1904年出版的《瑞典的泥炭地》(*Die Moore der Schweiz*)是泥炭地地学研究的集大成者. 随着地学的蓬勃发展, 新技术新方法在泥炭地研究中得到了应用. 1916年, 瑞典地理学家von Post将现代孢粉分析技术用于冰后期泥炭及其他沉积物的研究(Von Post, 1916). 1949年瑞典科学家du Rietz将泥炭沼泽分为雨养泥炭沼泽和矿养泥炭沼泽(Du Rietz, 1949), 至今广泛应用(阪口丰, 1983; 卜兆君等, 2005). 各种泥炭和湿地国际会议陆续召开, 国际学术组织也相继成立. 从1954年爱尔兰都柏林召开第一届泥炭国际会议以来, 到20世纪末一共举办了10次国际泥炭会议, 并于1968年在加拿大魁北克市第三次国际泥炭会议之际, 成立了国际泥炭地学会(International Peatland Society, IPS). 这是一个泥炭与泥炭地专家工作网络, 致力于研究泥炭地相关学科的方方面面, 涵盖社会影响、经济效应和环境影响. 1971年, 致力于湿地保护与可持续利用的政府间湿地公约在伊朗的Ramsar签订. 1980年国际湿地科学家学会(Society of Wetland Scientists, SWS)在美国成立, 致力于湿地科学研究、保护、管理和教育. 1996年致力于湿地保护的国际组织湿地国际(Wetland International, WI)在荷兰成立. 20世纪后半叶, 泥炭沼泽的研究, 已从资源利用为主的研究, 转向保护与利用并重的阶段, 湿地研究更加蓬勃发展, 出版了大量专著. 其中, 1986年由著名湿地科学

图 1 泥炭沼泽湿地研究简史

家Mitch和Gosselink合著的《湿地》(Wetlands)是20世纪湿地研究的代表性著作(Mitsch和Gosselink, 1986)。中国的泥炭沼泽研究开始于20世纪后半叶, 第一部专著是1965年出版的《若尔盖高原的沼泽》(中国科学院西部地区南水北调综合考察队, 1965), 之后陆续出版了《泥炭地学》(1990年)(柴岫, 1990), 《中国沼泽志》(1999年)(赵魁义, 1999)和《中国湿地植被》(1999年)(郎惠卿, 1999)等, 1992年中国政府也加入了国际湿地公约, 开启了中国湿地研究和保护事业的新纪元。

21世纪以来, 联合国2000年提出了千年发展目标(millennium development goals, MDGs), 2015年又提出了可持续发展目标(sustainable development goals, SDGs), 环境友好和可持续发展已经成为21世纪科学研究的重中之重。根据生物多样性与生态系统服务政府间科学政策平台(the intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services, IPBES)于2018年发布的《全球土地退化现状与恢复评估》报告, 相比其他生态系统, 湿地退化尤为严重, 过去300年来全球有87%的湿地损失, 自1900年以来全球有54%的湿地损失(Montanarella等, 2018)。Ramsar国际湿地公约发布《全球湿地展望》进一步指出, 自

1970年以来全球有35%的湿地损失, 是森林面积减少的3倍(Gardner等, 2018)。研究发现, 即便在不继续开采泥炭的情况下, 疏干泥炭地也将持续释放81Pg的碳。同时, 正在退化的泥炭地面积达到50.9万公顷(Leifeld和Menichetti, 2018)。因此, 泥炭沼泽保护与可持续利用是21世纪湿地科学面临的最为迫切的需求和最为重要的研究方向, 我们称这一时期为“生态学为主导的时期”, 最大化的提升湿地或沼泽的大自然贡献(NCPs)是湿地可持续发展研究与实践的终极目标。近20年来, 泥炭沼泽研究领域不断拓展, 研究不断深入, 新技术和新方法不断涌现, 生物多样性、全球变化、沼泽水文、碳循环等各个方面都取得了一系列的进展(杨永兴, 2002; 邓伟等, 2003; 王国平等, 2006; 王国平和吕宪国, 2008)。近年来, 相比北方泥炭地和热带泥炭地, 更为脆弱和敏感的青藏高原泥炭沼泽受到了广泛关注, 在古气候, 碳循环等方面开展了一系列的研究(Zhao等, 2014b; 孙晓红等, 2017; 朴世龙等, 2019; Liu等, 2019), 但对泥炭沼泽生态系统及其生物地球化学过程对全球气候变化的响应和适应机制方面还有待深入。纵观近20年来的研究进展, 泥炭学家越来越关注沼泽泥炭地的保护恢复及复湿对温室气体减排和碳增汇的影响(网络版附图1, <http://earthcn.scichina.com>)。有研究

发现, 受干扰的泥炭地恢复十年后碳平衡才会逐渐恢复自然水平(Strack和Zuback, 2013). 而泥炭地复湿是行之有效的缓解碳排放及碳增汇途径(Wilson等, 2016). 尽管欧美国家在研究领域仍处于领先地位, 但发展中国家与其差距正在缩小, 中国也已成为了全球泥炭沼泽湿地的研究中心之一(网络版附表1). 截至目前, 国际湿地公约签约国已有171个国家, 认定的国际重要湿地已达2300余个, 其中泥炭沼泽类型也占到一定的比例. 中国于2015年成立国际泥炭学会中国委员会, 并成为17个国家理事单位之一; 同年, 中国湿地保护协会成立; 2017年国际湿地科学家学会中国分会成立. 与世界湿地研究和保护事业一样, 中国湿地研究和保护事业已经走上了国际化和可持续发展研究为主的研究道路.

综上所述, 从泥炭沼泽研究的历史沿革与态势来看, 泥炭沼泽研究大体经历了三个时期: 第一个时期到18世纪, 是自然资源学导向研究为主的时期, 大多数研究着眼于泥炭利用与泥炭地开发; 第二时期从19世纪到20世纪, 是地学导向为主的时期, 大多数研究集中于泥炭沼泽地学方面的研究, 沼泽的保护和可持续利用20世纪受到广泛关注; 第三个时期从21世纪开始, 是生态学导向为主的时期, 泥炭沼泽研究已经走上了国际化和可持续发展研究为主的道路, 主要侧重于环境及气候变化条件下泥炭地的反馈, 泥炭地保护及大自然贡献提升等方面.

3 基本概念梳理

3.1 泥炭地与泥炭沼泽

泥炭地是一个地学和自然资源学的概念, 是从泥炭资源禀赋出发和界定的, 包括裸露泥炭地(泥炭沼泽)和埋藏泥炭地. 英语“mire”, 为泥炭沼泽, 属于湿地生态系统, 常伴随泥炭积累. 泥炭层最小厚度和有机质最低含量成为定义泥炭地和泥炭沼泽的重要指标(卜兆君等, 2005; 柴岫, 1984; 郑应顺和张则友, 1980). 国际上对于泥炭层最小厚度值的界定存在一些差异, 根据排水状况及开采目的等条件, 大体范围在0~70cm(表1). 目前被泥炭地研究学者广泛认可的泥炭层最小厚度值为30cm, 在国际泥炭协会的统计资料中已广泛应用. 中国在进行泥炭沼泽统计时, 对泥炭层最小厚度没有做界定(柴岫等, 1963), 但建议采用未疏干 $\geq 30\text{cm}$

及疏干 $\geq 20\text{cm}$ 的标准(柴岫, 1990). 中国土壤分类系统规定泥炭土的泥炭层最小厚度应为50cm(全国土壤普查办公室, 1993), 而中国土壤系统分类指出泥炭土泥炭层最小厚度为40cm, 泥炭藓泥炭土泥炭层最小厚度为60cm(龚子同, 1999). 由于资源禀赋不同, 对于泥炭地土壤有机质含量在不同的国家往往采用不同的标准, 而且差异较大, 有机质最低含量介于20~60%(表1). 中国早期研究认为泥炭地以泥炭土为主体, 严格来说土壤有机质含量至少占到50%以上(柴岫, 1990). 在中国土壤分类系统中, 泥炭土有机质含量早期标准要求高于30~60%(全国土壤普查办公室, 1993), 而后又更为严格的界定为20~35%(龚子同, 1999), 与国际标准更为接近.

泥炭沼泽是沼泽的一种, 属于一类独特的湿地生态系统, 以沼生或湿生植物为优势植物, 有特定的淹水条件特别是静水的淹水条件和泥炭的不断发育. 尽管各个国家和地区基于泥炭资源调查和土壤分类的需要, 对泥炭有机质含量和泥炭层厚度进行了精确的划分与界定, 但从生态系统结构和功能的角度出发, 我们比较赞同柴岫等老一辈学者的认识(柴岫等, 1963), 可能不宜对有机质含量和泥炭层厚度做更多的界定.

3.2 雨养沼泽与矿养沼泽

水分是影响泥炭沼泽形成及其特性最为重要的因素. 补给和滋养泥炭沼泽的水分包括雨水、地表水和地下水等. 早在1823年Dau就认识到高位泥炭地的降雨补给性, 认为其“只受到雨水和露水”的滋养(Dau, 1823). 之后, 德国学者Weber根据水文特征、地貌等特征将泥炭沼泽划分矿养泥炭沼泽(Niedermoor)披盖式雨养泥炭(bergangsmoor)和隆起式雨养泥炭沼泽(Hochmoor), 对此后泥炭沼泽分类产生了深远影响(Weber, 1902). 同时期的瑞典地理学家von Post把降雨补给的泥炭地定义为降水型泥炭地(mobrogen); 把地表水和地下水补给的泥炭地定义为地表水型泥炭地(soligen)(von Post, 1909; 阪口丰, 1983; 卜兆君等, 2005). 降雨补给的泥炭地, 营养物质贫乏, 多为贫营养型; 地表水和地下水混合补给为主的泥炭地, 营养物质丰富, 多为富营养型. 基于沼泽水体化学来源和组分差异, 瑞典地理学家du Rietz提出, 以养分来源为依据将泥炭沼泽分为降雨营养型泥炭沼泽即雨养泥炭沼泽(bog)和矿物质营养型泥炭沼泽即矿养泥炭沼泽(fen)

表 1 不同国家地区泥炭地泥炭层最小厚度与品质标准

国家/地区	泥炭层最小厚度	有机质含量 (干物质重量)	数据来源
德国和日本	20cm		阪口丰(1983)
爱尔兰	45cm(疏干)、30cm(未疏干)	30% 20%(黏粒>50%)	Hammond(1981)
加拿大	10cm(发育于基岩)、40cm、60cm	30%	Soil Classification Working Group(1998)
国际土壤协会(IUSS)	30cm(未排水)		Gherassimov(1937)
FAO	40cm、60cm(泥炭藓)、0cm(发育于基岩)	20%(无黏粒); 30%(黏粒>60%) 35%(排水)	Fao(2011)
瑞典	40cm		阪口丰(1983)
英格兰和威尔士	15cm、60cm	30% 20%(黏粒>50%)	Avery(1973)、阪口丰(3)
苏格兰	50cm	60%	Soil Survey of Scotland(1984)
澳大利亚	50cm		阪口丰(1983)
丹麦	33cm		阪口丰(1983)
苏联	30cm(排水)、20cm(未排水)		柴岫(1990)
美国	40cm、60cm(泥炭藓)、30cm(发育于基岩)	35%	柴岫(1990)
中国	未作具体界定, 统计面积时按30cm(排水)、20cm(未排水)	30%、50%(严格)	柴岫等(1963)、柴岫(1990)
中国	50cm	30%(低位)、50%(中位)、60%(高位)	全国土壤普查办公室(1993)
中国	40cm、60cm(泥炭藓)	20%(无黏粒)、30%(黏粒>60%)、 35%(排水)	龚子同(1999)

(Du Rietz, 1949; 阪口丰, 1983; 卜兆君等, 2005). 近年来有部分学者对雨养泥炭沼泽的养分来源问题开展了更细致的研究, 发现干旱季节(Glaser等, 1997)和特定区域(Lamers等, 1999), 地下水也可能会成为其养分的来源. 尽管如此, 以养分的主要来源为基础来界定雨养泥炭沼泽和矿养泥炭沼泽仍然具有科学价值(卜兆君等, 2005).

同时, 由于养分来源和水分状况的不同, 雨养泥炭沼泽和矿养泥炭沼泽的植被状态和土壤性质都有着极大的区别(阪口丰, 1983; 卜兆君等, 2005). 雨养泥炭沼泽, 多为高位泥炭沼泽(Aartolahti, 1965; 阪口丰, 1983), 中央部位地势比边缘部位稍高, 有学者称之为凸形泥炭沼泽(Oswald, 1930), 其优势植被为泥炭藓. 由于泥炭藓残体较难分解, 因此腐殖化度相对较低, 矿物质含量相对较少, 土壤pH多呈酸性. 矿养泥炭沼泽多为低位泥炭沼泽(Aartolahti, 1965), 中央部位地势比边缘部位稍低或持平, 也称为凹形泥炭沼泽(Oswald, 1930), 其优势植被大多是草本植物. 由于草本植物凋落物和残体

相对容易分解, 因此腐殖化度相对较高, 矿物质来源较多, 土壤pH多呈弱酸性、中性或弱碱性(图2). 雨养泥炭沼泽和矿养泥炭沼泽存在对立统一关系. 凸形的泥炭沼泽, 降雨补给, 营养贫乏, 偏酸性; 凹形的泥炭沼泽, 地表水和地下水主要补给, 营养丰富, 偏弱酸性、中性或弱碱性. 但二者在一定条件下亦可相互转化.

从泥炭沼泽发展规律的角度出发, 19世纪末和20世纪初, 北欧国家和苏联学者认为矿养泥炭沼泽是泥炭沼泽发育的初期, 随着泥炭的逐步积累, 泥炭沼泽表面趋于平坦, 养分状况和泥炭积累数量在沼泽内部出现差异, 沼泽边缘主要由矿物质含量丰富的地下水和地表水补给, 发育草本植物, 分解较快, 泥炭积累相对较慢, 而沼泽中间区域主要由降雨补给, 发育泥炭藓, 分解较慢, 泥炭积累相对较快, 从而中心区域慢慢扩大, 最终形成雨养泥炭沼泽(柴岫, 1990). 简言之, 如果泥炭沼泽发育的自然条件(如丰沛的降雨等)长期稳定, 泥炭沼泽会由初期的矿养泥炭沼泽发育成为顶级的雨养泥炭沼泽(Macdonald等, 2006). 但全球范围内,

图2 雨养泥炭沼泽和矿养泥炭沼泽特征示意图

并不是所有区域都存在这样的发育态势。例如,位于青藏高原东南缘的若尔盖泥炭沼泽,已经经过一万四千年的发育,并未形成雨养泥炭沼泽(Zhao等, 2011; Chen等, 2014),而在爱沙尼亚Saaremaa岛上的一处矿养泥炭沼泽是由雨养泥炭沼泽发育而来的(Blaus等, 2019)。黄锡畴(1982)提出泥炭沼泽发育具有多种模式,并非遵循统一模式,在研究泥炭沼泽湿地的发生发展及演替过程中,不仅要考虑时间因素,也不能忽略地域差异。

因此,由矿养泥炭沼泽向雨养泥炭沼泽演替模式的传统认识,可能存在一定的局限性,需要从全球尺度重新界定泥炭沼泽生态系统的演替模式,气候顶级的演替模式可能并不适用于描述非地带性的泥炭沼泽生态系统。

4 泥炭沼泽土壤与面积

4.1 泥炭沼泽土壤

泥炭沼泽的土壤是泥炭沼泽发育过程中大量植物残体等有机质的堆积,并与矿物质复杂作用形成的产物,泥炭积累是其显著的特征。中国古代就对泥炭沼泽的土壤有过描述,如夏代的“涂泥”、周代的“褐泽”等(王云森, 1978)。20世纪30年代,谢家荣介绍土壤分类时,提到了沼泽土(谢家荣, 1931);新中国成立初期,中国沿袭了美国马伯特(Marbut)土壤分类,水成土作为亚纲,湿土作为土类,包含腐殖质湿土、矿质湿土和水稻土三个亚类(宋达泉, 1950);1954年中国土壤学会第一次代表大会,受前苏联学派的影响,采用土壤发

生分类,将沼泽土作为一个土类提出,下设泥炭沼泽土、腐殖质泥炭沼泽土和腐殖质沼泽土三个亚类。1978年,中国土壤学会提出了《土壤分类暂行草案》,将水成土作为一个土纲提出,下设沼泽土和泥炭土两个土类,六个亚类(龚子同等, 1978)。1993年《中国土壤分类系统》中,水成土仍是独立的土纲,分为矿质水成土和有机水成土两个亚纲,沼泽土和泥炭土两个土类,九个亚类(全国土壤普查办公室, 1993),该分类体系是中国土壤分类的国家标准(中国国家标准化管理委员会, 2000, 2009)。也有沼泽和湿地研究学者,从沼泽和湿地生态系统的角度出发,提出单列沼泽土纲或者湿地土纲,3个或者6个土类,22个或者69个亚类(郑应顺等, 1981; 杨青和刘吉平, 2007)。综上所述,与欧美国家将泥炭沼泽的土壤定义为有机土、在土纲一级(Soil Classification Working Group, 1998; Soil Survey Staff, 1999; FAO, 2011)。且下设亚类数量较多的分类不同,中国现行的土壤发生分类将泥炭沼泽土壤纳入水成土纲,土壤系统分类将泥炭沼泽土壤纳入有机土纲,亚类较少(系统分类: 32个;发生分类: 9个),显著少于欧美国家的亚类数量(网络版附表2)。从中国现行的土壤分类系统来看,泥炭沼泽土壤分类及其相关系统仍有待完善,需要参考国际通用的有机土分类标准,细分出更多的土类和亚类。

泥炭沼泽土壤的形成是特定环境下植被和动物残体缓慢累积的结果。其土壤形成过程及累积速率受泥炭地厌氧好氧交替环境的变化所调控,有研究表明,北方泥炭、热带泥炭和南方泥炭的累积速率分别达到18、12和22gC m⁻² yr⁻¹(Yu等, 2010)。由于长期和短期内,环境变化的巨大差异,泥炭的累积速率也可能差距四倍之多(Wang等, 2015)。这些经过长期累积的泥炭,厚度可达6m左右(Chen等, 2014)。一直以来,学者较为关注泥炭表层植被及土壤过程,认为其为活性层,广泛参与碳循环过程。而深层泥炭由于难降解物质较多,被称为惰性层,较少参与碳循环。进而维持了泥炭地土壤碳库稳定性。然而,随着近年来人类活动和气候变化的加剧,深层泥炭土壤复杂有机物大量转化成生物可利用的碳,重新进入碳循环(Dorrepaal等, 2009)。使得泥炭地不同土壤剖面的碳库稳定性成为关注的焦点。关于泥炭地碳库稳定性方面两大现有理论分别为酶门理论和铁门理论。前者认为,泥炭地退化导致的氧气含量增加,给泥炭土中酚氧化酶提供了良好的反应条件,

表 2 世界湿地和泥炭地分布面积

年代	面积(百万公顷)	类型	文献
1929	100	泥炭沼泽	Liu和Liu(2009)
1964	112	泥炭沼泽	Liu和Liu(2009)
1969	150	泥炭沼泽	Liu和Liu(2009)
1971	320	泥炭沼泽	Bazilevich等(1971)
1974	230	泥炭沼泽	Moore和Bellamy(1974)
1974	121	泥炭沼泽	阪口丰(1983)
1978	240	泥炭沼泽	Fad/Unesco(1971-1978)
1980	179	泥炭沼泽	Liu和Liu(2009)
1981	400	泥炭沼泽	Kivinen和Pakarinen(1981)
1984	120	泥炭沼泽	Buringh(1984)
1985	354	泥炭沼泽	Mona(1984)
1980s	185	泥炭沼泽	Lehner和Döll(2004)
2002	314	泥炭沼泽	Joosten和Clarke(2002)
2009	363	泥炭沼泽	Joosten(2009)
2011	441	泥炭沼泽	Yu(2011)
2012	332	泥炭沼泽	Fao/Iiasa/Isric/Isscas/Jrc(2012)
2018	423	泥炭沼泽	Xu等(2018)
1975	200	湿地	Lieth(1975)
1979	360	湿地	Ajtay等(1979)
1982	280	湿地	Post等(1982)
1984	440	湿地	Esser(1984)
1985	260	湿地	Olson等(1985)
1986	349	湿地	Armentano和Menges(1986)
1987	530	湿地	Matthews和Fung(1987)
1989	569	湿地	Aselmann和Crutzen(1989)
1980s	1070~1270	湿地	Lehner和Döll(2004)
1992~1993	456	湿地	Loveland等(2000)
1993	388~408	湿地	Maltby和Immirzi(1993)
1993~2000	212~586	湿地	Prigent等(2007)
2000	717	湿地	Chen等(2015)
2000	388	湿地	Friedl等(2002)
2000	604	湿地	Bartholomé和Belward(2005)
2003	282	湿地	Tateishi等(2011)
2000~2005	431	湿地	Tuanmu和Jetz(2014)
2005	510	湿地	Bicheron等(2006)
2008	457	湿地	Tateishi等(2014)
2009	500	湿地	Sophie和Pierre(2010)
2010	710	湿地	Chen等(2015)
2007~2011	270~817	湿地	Wania等(2013)
1984~2015	448	湿地	Pekel等(2016)
2018	1210	湿地	Gardner等(2018)
潜在分布	2126	湿地	Fan等(2013)
潜在分布	1851	湿地	Zhao等(2014a)
潜在分布	2983	湿地	Hu等(2017)

使限制水解酶活性和微生物生长的酚类物质得以分解, 加速碳输出(Freeman等, 2001). 后者认为, 水位降低增强了与铁结合的木质素的稳定性, 同时铁进一步抑制了酚氧化酶活性, 促进了酚类物质的积累, 进而降低水解酶活性, 从而增强土壤有机碳库的稳定性. 可见, 泥炭累积过程中, 厌氧好氧交替产生的环境差异和矿物结构变化都将对土壤过程产生重要影响(Wang等, 2017).

泥炭沼泽土壤, 由于土壤有机质含量丰富, 多归为有机土, 在土壤理化和生物学特性上与矿质土壤有着显著的差异, 其分析测试的方法也存在较大差异(蔡体久等, 2010; 李丽等, 2011; 廖成章等, 2019). 现有的大量关于泥炭土壤的研究, 很大一部分采用了矿质土壤的分析方法, 在相关规律的解析上可能存在较大误导. 例如, 很多研究将植物残体剔除(林春英等, 2019; 刘英等, 2019), 从而可能低估了泥炭沼泽土壤有机质含量. 因此, 泥炭沼泽土壤的研究应该严格按照泥炭沼泽土壤(有机土)的分析方法来开展相关的研究, 从而客观地解析泥炭沼泽土壤理化性质和生物地球化学过程(Wang等, 2017).

4.2 泥炭沼泽面积

目前, 基于统计数据 and 遥感的方法, 得出的全球湿地面积介于 $200\sim 1270\times 10^4\text{km}^2$ (表2). 变异性来源于不同的数据源、标准和方法, 当然也有湿地面积的时间动态. 2018年国际湿地公约(RAMSAR)秘书处发布的《全球湿地展望》指出, 全球现存湿地面积为 $1210\times 10^4\text{km}^2$, 其中自然湿地占到约88%, 大于 $1000\times 10^4\text{km}^2$ (Gardner等, 2018). 泥炭沼泽作为独特的湿地生态系统, 广泛分布于世界各地, 沼泽植被和土壤均具有隐域性, 北半球分布较多, 南半球分布较少, 赤道热带雨林地区也有大量的泥炭沼泽分布. 由于各国关于泥炭地(泥炭沼泽)的概念并未统一, 统计的标准也不尽一致(表2), 因此全球泥炭沼泽的面积还存在较大争议. 1929年Bulow最早提出全球泥炭地面积为 $100\times 10^4\text{km}^2$ (Liu和Liu, 2009). 由于技术进步和沼泽调查的增加, 历次国际泥炭会议所发布泥炭地面积均在增加. 如第二次国际泥炭会议统计的全球泥炭地面积为 $112\times 10^4\text{km}^2$, 第三次国际泥炭会议统计的为 $150\times 10^4\text{km}^2$, 第六次国际泥炭会议统计的为 $179\times 10^4\text{km}^2$ (Liu和Liu, 2009). 各国学者也尝试基于不

同方法和统计标准, 统计全球泥炭沼泽湿地的面积, 其结果大致介于 $121\times 10^4\sim 441\times 10^4\text{km}^2$ (表2). 从过去二十年的数据来看, 全球泥炭地面积数据变化不大, 因此, 全球泥炭地(泥炭厚度大于30cm)面积很可能大于 $400\times 10^4\text{km}^2$ (Maltby和Immirzi, 1993). 有学者基于过程模型, 预测了全球湿地的潜在分布面积, 介于 $1851\times 10^4\sim 2983\times 10^4\text{km}^2$ (Gardner等, 2018). 由此可见, 若不对泥炭厚度和有机质含量做更多界定, 那么现有泥炭沼泽面积要远大于 400km^2 而小于自然湿地的面积($1000\times 10^4\text{km}^2$). 不同研究对泥炭地的限定及对泥炭厚度和有机质的限定直接导致了全球泥炭面积估算的不同结果, 如最新对于欧洲泥炭面积估算结果为 $59\times 10^4\text{km}^2$, 而若加上小于30cm深度的浅层泥炭, 其面积将达到 $100\times 10^4\text{km}^2$ (Tanneberger等, 2017). 中国泥炭面积在不同研究中也从 $0.13\times 10^4\sim 13\times 10^4\text{km}^2$ 不等(Xu等, 2018). 可见, 泥炭地面积的估算存在相当大的不确定性, 需要根据不同泥炭类型, 确定统一的界定标准及估算方法, 以便于对全球范围泥炭沼泽面积进行重新估算.

5 结论

综上所述, 泥炭沼泽是一类独特的湿地生态系统, 有特定的淹水条件下的泥炭发育或即将发育, 在泥炭资源调查和土壤分类中, 依然需要沿用有机质含量和泥炭层厚度这两个指标进行精确界定. 但从泥炭地生态系统结构和功能角度, 不宜对这两个指标过分强调. 以水分和养分的主要来源界定的雨养泥炭沼泽和矿养泥炭沼泽仍然具有科学价值. 从中国现行的土壤分类系统来看, 泥炭沼泽土壤分类及其属性亟待完善, 以便于泥炭沼泽土壤研究方法的改进. 基于现有的泥炭沼泽研究技术与方法, 使得泥炭沼泽面积具有很大的不确定性, 很可能被较大程度的低估. 随着人类对自然资源属性及其利用观念的转变, 泥炭沼泽研究经历了从自然资源学导向到地学和生态学导向研究的三个阶段. 中国泥炭沼泽相关研究开始于20世纪40年代末, 晚于欧洲相关研究两百余年, 但由于伴随着社会经济的高速发展, 中国泥炭沼泽研究快速经历了自然资源学导向和地学导向时期, 在泥炭沼泽以生态学为导向的可持续发展时期与全球其他泥炭沼泽研究中心呈现齐头并进的发展态势.

参考文献

- 阪口丰. 1983. 泥炭地地学. 郑哲明, 译. 北京: 科学出版社
- 博奇, 马津格, 戴国良, 译. 1989. 苏联沼泽生态系统. 北京: 科学出版社
- 卜兆君, 王升忠, 谢宗航. 2005. 泥炭沼泽学若干基本概念的再认识. 东北师大学报(自然科学版), 37: 105–110
- 蔡体久, 辛国辉, 张阳武, 戴潇漩, 刘斌. 2010. 小兴安岭泥炭藓湿地土壤有机碳分布特征. 中国水土保持科学, 8: 109–113
- 柴岫, 郎惠卿, 金树仁. 1963. 沼泽学的对象与任务. 吉林师大学报, (1): 125–135
- 柴岫. 1990. 泥炭地学. 北京: 地质出版社
- 柴岫. 1984. 泥炭与泥炭地. 江西腐植酸, (4): 64–66
- 陈禹章. 1958. 中国东北地区泥炭资源调查及利用. 土壤通报, 2: 22–31
- 邓伟, 潘响亮, 栾兆擎. 2003. 湿地水文学研究进展. 水科学进展, 14: 421–427
- 龚子同, 赵其国, 曾昭顺, 林培, 王人潮. 1978. 中国土壤分类暂行草案. 土壤, (5): 168–169
- 龚子同, 等. 1999. 中国土壤系统分类——理论·方法·实践. 北京: 科学出版社
- 黄锡畴. 1982. 试论沼泽的分布和发育规律. 地理科学, 2: 193–201
- 郎惠卿. 1999. 中国湿地植被. 北京: 科学出版社
- 李丽, 高俊琴, 雷光春, 吕偲, 索郎夺尔基. 2011. 若尔盖不同地下水位泥炭湿地土壤有机碳和全氮分布规律. 生态学杂志, 30: 2449–2455
- 廖成章, 慈雪伦, 周天元, 王志臣, 唐小平. 2019. 中国泥炭沼泽碳库调查和监测技术体系构建. 湿地科学, 17: 417–423
- 林春英, 李希来, 李红梅, 孙海松, 韩辉邦, 王启花, 金立群, 孙华方. 2019. 不同退化高寒沼泽湿地土壤碳氮和贮量分布特征. 草地学报, 27: 805–816
- 林英. 1956. 南昌西山泥炭沼泽的初步研究. 植物学报, 5: 15–32
- 刘英, 曹生奎, 曹广超, 陈克龙, 兰垚, 汉光昭, 杨羽帆, 雷义珍. 2019. 青海湖2种高寒湿地土壤碳氮化学计量特征研究. 西南农业学报, 32: 2630–2637
- 朴世龙, 张新平, 陈安平, 刘强, 连旭, 王旭辉, 彭书时, 吴秀臣. 2019. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响. 中国科学: 地球科学, 49: 1321–1334
- 全国土壤普查办公室. 1993. 中国土壤分类系统. 北京: 农业出版社
- 宋达泉. 1950. 中国土壤分类标准的商榷. 全国土壤肥料会议汇刊, 21–26
- 孙晓红, 赵艳, 李泉. 2017. 青藏高原东部若尔盖盆地全新世泥炭地发育和植被变化. 中国科学: 地球科学, 47: 1097–1109
- 梭颇, 李庆逵, 李连捷. 1936. 中国之土壤. 土壤特刊乙种一号, 1: 1–244
- 王国平, 贾琳, 刘景双, 王金达. 2006. 国外大气沉降泥炭沼泽档案研究进展. 湿地科学, 4: 69–74
- 王国平, 吕宪国. 2008. 沼泽湿地环境演变研究回顾与展望-纪念中国科学东北地理与农业生态研究所建所50周年. 地理科学, 28: 309–313
- 王云森. 1978. 中国古代的土壤分类. 土壤, (5): 175–176
- 谢家荣. 1931. 土壤分类及土壤调查. 土壤专报, 2: 1–20
- 杨青, 刘吉平. 2007. 中国湿地土壤分类系统的初步探讨. 湿地科学, 5: 111–116
- 杨永兴. 2002. 国际湿地科学研究的主要特点、进展与展望. 地理科学进展, 21: 111–120
- 赵魁义. 1999. 中国沼泽志. 北京: 科学出版社
- 郑应顺, 张则友. 1980. 试论泥炭的应用分类. 土壤学报, 17: 11–19
- 郑应顺, 祖文辰, 张一, 许林书. 1981. 试拟中国沼泽土壤的分类系统. 东北师大学报(自然科学版), (4): 67–74
- 中国国家标准化管理委员会. 2000. 中国土壤分类与代码. GB/T 17296-1998
- 中国国家标准化管理委员会. 2009. 中国土壤分类与代码. GB/T 17296-2009
- 中国科学院西部地区南水北调综合考察队. 1965. 若尔盖高原的沼泽. 北京: 科学出版社
- Aartolahti T. 1965. Oberflächenformen von hochmooren und ihre entwicklung in südwest-häme und nord-satakunta. Fennia Int J Geogr, 93: 1–268
- Ajtay G L, Ketner P, DuVigneaud P. 1979. Terrestrial Primary Productivity and Phytomass. Chichester, New York, Brisbane, Toronto: Wiley
- Armentano T V, Menges E S. 1986. Patterns of change in the carbon balance of organic soil-wetlands of the temperate zone. J Ecol, 74: 755–774
- Aselmann I, Crutzen P J. 1989. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions. J Atmos Chem, 8: 307–358
- Avery B W. 1973. Soil classification in the soil survey of england and wales. J Soil Sci, 24: 324–338
- Bartholomé E, Belward A S. 2005. Glc2000: A new approach to global land cover mapping from earth observation data. Int J Remote Sens, 26: 1959–1977
- Bazilevich N I, Rodin L Y, Rozov N N. 1971. Geographical aspects of biological productivity. Soviet Geogr, 12: 293–317
- Bicheron P, Leroy M, Brockmann C. 2006. Globcover: A 300 m global land cover product for 2005 using envisat meris time series. In: Proceedings of the Recent Advances in Quantitative Remote Sensing Symposium. 538–542
- Blaus A, Reitalu T, Amon L, Vassiljev J, Alliksaar T, Veski S. 2019. From bog to fen: Palaeoecological reconstruction of the develop-

- ment of a calcareous spring fen on saaremaa, estonia. *Veg Hist Archaeobot*, doi: 10.1007/s00334-00019-00748-z
- Buringh P. 1984. Organic carbon in soils of the world. In: Worldwell G M, ed. *The Role of Terrestrial Vegetation in the Global Carbon Cycle: Measurement by Remote Sensing*. Chichester: Wiley
- Chen H, Yang G, Peng C, Zhang Y, Zhu D, Zhu Q, Hu J, Wang M, Zhan W, Zhu E, Bai Z, Li W, Wu N, Wang Y, Gao Y, Tian J, Kang X, Zhao X, Wu J. 2014. The carbon stock of alpine peatlands on the Qinghai-Tibetan Plateau during the Holocene and their future fate. *Quat Sci Rev*, 95: 151–158
- Chen J, Chen J, Liao A, Cao X, Chen L, Chen X, He C, Han G, Peng S, Lu M, Zhang W, Tong X, Mills J. 2015. Global land cover mapping at 30m resolution: A POK-based operational approach. *ISPRS J Photogram Remote Sens*, 103: 7–27
- Clements F E. 1916. *Plant Succession: An Analysis of the Development of Vegetation*. Washington DC: Carnegie Institution of Washington
- Dau J H C. 1823. *Neues handbuch über den torf, dessen natur, entstehung und wiedererzeugung*. Leipzig, DE: J.E. Hinrichssche Buchhandlung
- Díaz S, Pascual U, Stenseke M, Martín-López B, Watson R T, Molnár Z, Hill R, Chan K M A, Baste I A, Brauman K A, Polasky S, Church A, Lonsdale M, Larigauderie A, Leadley P W, van Oudenhoven A P E, van der Plaats F, Schröter M, Lavorel S, Aumeeruddy-Thomas Y, Bukvareva E, Davies K, Demissew S, Erpul G, Failler P, Guerra C A, Hewitt C L, Keune H, Lindley S, Shirayama Y. 2018. Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359: 270–272
- Dorrepaal E, Toet S, van Logtestijn R S P, Swart E, van de Weg M J, Callaghan T V, Aerts R. 2009. Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic. *Nature*, 460: 616–619
- du Rietz G E. 1949. Huvudenheter och huvudgränser i svensk myrvegetation. *Svensk Botanisk Tidskrift*, 43: 274–309
- Esser G. 1984. Significance of carbon pools for the atmospheric CO₂: A proposed model structure. *Interaction between climate and biosphere*. Lisse: Swets & Zeittinger
- FAD/UNESCO. 1971-1978. *Soil map of the world, 1:5000000*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations
- Fan Y, Li H, Miguez-Macho G. 2013. Global patterns of groundwater table depth. *Science*, 339: 940–943
- FAO. 2011. *Classification of organic soils*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations
- FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC. 2012. *Harmonized world soil database (version 1.2)*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations
- Freeman C, Ostle N, Kang H. 2001. An enzymic “latch” on a global carbon store. *Nature*, 409: 149
- Friedl M A, McIver D K, Hodges J C F, Zhang X Y, Muchoney D, Strahler A H, Woodcock C E, Gopal S, Schneider A, Cooper A, Baccini A, Gao F, Schaaf C. 2002. Global land cover mapping from modis: Algorithms and early results. *Remote Sens Environ*, 83: 287–302
- Gardner R, Finlayson M, Davidson N, Damm A, Fennessy S, Darwall W, Dima M, Everard M, McRae L, Perennou C, Stroud D, Baker C, Kumar R, Bambaradeniya C, Fang W T, Davies P, Hilomen V, Kulindwa K, Martinez L, Okuno E. 2018. *Global wetland outlook: State of the world's wetlands and their services to people*. Gland, Switzerland: Ramsar Convention Secretariat
- Gherassimov D A. 1937. On the principles of the classification, surveying and mapping of peat deposits. *Int Soc Soil Sci*, B: 288–291
- Glaser P H, Siegel D I, Romanowicz E A, Shen Y P. 1997. Regional linkages between raised bogs and the climate, groundwater, and landscape of north-western minnesota. *J Ecol*, 85: 3–16
- Hammond R F. 1981. *The Peatlands of Ireland*. Dublin: An Foras Taluntais
- Hu S, Niu Z, Chen Y, Li L, Zhang H. 2017. Global wetlands: Potential distribution, wetland loss, and status. *Sci Total Environ*, 586: 319–327
- Joosten H. 2009. *The global peatland CO₂ picture: Peatland status and drainage related emissions in all countries of the world*. Netherlands: Wetlands International
- Joosten H, Clarke D. 2002. *Wise use of mires and peatlands*. Jyväskylä, Finland: International Mire Conservation Group and International Peat Society
- King W. 1685. *Of the bogs, and loughs of ireland by mr. William king, fellow of the dublin society, as it was presented to that society*. Philos T (1685–1775), 15: 948–960
- Kivinen E, Pakarinen E. 1981. Geographical distribution of peat resources and major peatland complex types in the world. *Ann Acad Sci Fenn*, 132: 5–28
- Lamers L P M, Farhoush C, Van Groenendaal J M, Roelofs J G M. 1999. Calcareous groundwater raises bogs; the concept of ombrotrophy revisited. *J Ecol*, 87: 639–648
- Lehner B, Döll P. 2004. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *J Hydrol*, 296: 1–22
- Leifeld J, Menichetti L. 2018. The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nat Commun*, 9: 1071
- Lieth H. 1975. Primary production of the major vegetation units in the world. *Ecol Stud*, 14: 203–215
- Liu L, Chen H, Liu X, Yang Z, Zhu D, He Y, Liu J. 2019. Contemporary, modern and ancient carbon fluxes in the zoige

- peatlands on the qinghai-tibetan plateau. *Geoderma*, 352: 138–149
- Liu Z, Liu X. 2009. The global distribution of peat. In: Konings W N, Albers S V, Konings S M, Driessen A J M, eds. *The Encyclopedia of Life Support System*. Oxford: EOLSS Publishers
- Loveland T R, Reed B C, Brown J F, Ohlen D O, Zhu Z, Yang L, Merchant J W. 2000. Development of a global land cover characteristics database and igbp discover from 1 km avhrr data. *Int J Remote Sens*, 21: 1303–1330
- Macdonald G M, Beilman D W, Kremenetski K V, Sheng Y, Smith L C, Velichko A A. 2006. Rapid early development of circumarctic peatlands and atmospheric CH₄ and CO₂ variations. *Science*, 314: 285–288
- Maltby E, Immirzi P. 1993. Carbon dynamics in peatlands and other wetland soils regional and global perspectives. *Chemosphere*, 27: 999–1023
- Matthews E, Fung I. 1987. Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources. *Glob Biogeochem Cycle*, 1: 61–86
- Mitsch W J, Gosselink J G. 1986. *Wetlands*. New York: Van Nostrand Reinhold
- Mona B N. 1984. *Fuel peat in developing countries*. Dublin: Ireland
- Montanarella L, Scholes R, Brainich A. 2018. The ipbes assessment report on land degradation and restoration. Bonn: Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services
- Moore R D, Bellamy D J. 1974. *Peatlands*. London: Elek Science
- Olson J S, Watts J A, Allison L J. 1985. Major world ecosystem complexes ranked by carbon in live vegetation. A Data Base. Ornl-5862 (data package and description). Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratories
- Oswald H. 1930. Södra sveriges mossstyper. *Svensk Geografisk Årsbok*, 117–140
- Overbeck F. 1963. Aufgaben botanisch-geologischer moorforschung in nordwestdeutschland. *Deutsche Botanische Gesellschaft*, 76: 2–12
- Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, Belward A S. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540: 418–422
- von Post L. 1909. Stratigraphische studien über einige torfmoore in närke. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, 31: 629–706
- Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 298: 156–159
- Prigent C, Papa F, Aires F, Rossow W B, Matthews E. 2007. Global inundation dynamics inferred from multiple satellite observations, 1993–2000. *J Geophys Res*, 112: D12107
- Rennie R R. 1810. *Essays on the Natural History and Origin of Peat Moss*. Edinburgh: George Ramsay & Co
- Soil Survey of Scotland. 1984. *Organization and methods of the 1:250000 soil survey of scotland*. Aberdeen: Great Britain at the University Press
- Soil Classification Working Group. 1998. *The Canadian Sysfem of Soii Classification*. Ottawa: Agriculture and Agri-Food Canada publication
- Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy a Basic System of soil classification for making and Interpreting Soil Surveys*. Washington D C: Government Printing Office
- Sophie B, Pierre D. 2010. *Globcover 2009 Products Description and Validation Report*. Paris: European Space Agency
- Strack M, Zuback Y C A. 2013. Annual carbon balance of a peatland 10 yr following restoration. *Biogeosciences*, 10: 2885–2896
- Tanneberger F, Tegetmeyer C, Busse S, Barthelmes A, Shumka S, Mariné A M, Jenderedjian K, Steiner G M, Essl F, Eitzold J, Mendes C, Kozulin A, Frankard P, Milanović Đ, Ganeva A, Apostolova I, Alegro A, Delipetrou P, Navrátilová J, Risager M, Leivits A, Fosaa A M, Tuominen S, Muller F, Bakuradze T, Sommer M, Christanis K, Szurdoki E, Oskarsson H, Brink S H, Connolly J, Bragazza L, Martinelli G, Aleksāns O, Priede A, Sungaila D, Melovski L, Belous T, Saveljić D, Vries F d, Moen A, Dembek W, Mateus J, Hanganu J, Sirin A, Markina A, Napreenko M, Lazarević P, Stanová V Š, Skoberne P, Pérez P H, Pontevedra-Pombal X, Lonnstad J, Küchler M, Wüst-Galley C, Kirca S, Mykytiuk O, Lindsay R, Joosten H. 2017. The peatland map of europe. *Mires Peat*, 19: 1–17
- Tansley A G. 1935. The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 16: 284–307
- Tateishi R, Hoan N T, Kobayashi T, Alsaadeh B, Tana G, Phong D X. 2014. Production of global land cover data-GLCNMO2008. *J Geogr Geol*, 6: 99–123
- Tateishi R, Uriyangqai B, Al-Bilbisi H, Ghar M A, Tsend-Ayush J, Kobayashi T, Kasimu A, Hoan N T, Shalaby A, Alsaadeh B, Enkhzaya T, Gagentana T, Sato H P. 2011. Production of global land cover data-GLCNMO. *Int J Digital Earth*, 4: 22–49
- Tuanmu M N, Jetz W. 2014. A global 1-km consensus land-cover product for biodiversity and ecosystem modelling. *Glob Ecol Biogeogr*, 23: 1031–1045
- von Post L. 1916. Einige sudschwedischen quellmoore. *Bull Geol Inst Univ Uppsala*, 15: 219–278
- Wang M, Yang G, Gao Y, Chen H, Wu N, Peng C, Zhu Q, Zhu D, Wu J, He Y, Tian J, Zhao X, Zhang Y. 2015. Higher recent peat C accumulation than that during the holocene on the Zoige plateau. *Quat Sci Rev*, 114: 116–125
- Wang Y, Wang H, He J S, Feng X. 2017. Iron-mediated soil carbon response to water-table decline in an alpine wetland. *Nat Commun*, 8: 15972

- Wania R, Melton J R, Hodson E L, Poulter B, Ringeval B, Spahni R, Bohn T, Avis C A, Chen G, Eliseev A V, Hopcroft P O, Riley W J, Subin Z M, Tian H, van Bodegom P M, Kleinen T, Yu Z C, Singarayer J S, Zürcher S, Lettenmaier D P, Beerling D J, Denisov S N, Prigent C, Papa F, Kaplan J O. 2013. Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: Methodology of a model inter-comparison project (WETCHIMP). *Geosci Model Dev*, 6: 617–641
- Weber C A. 1902. *Über die vegetation und entstehung des hochmoors von augstun im memeldelta*. Berlin: Verlagsbuchhandlung Paul Parey
- Wilson D, Farrell C A, Fallon D, Moser G, Müller C, Renou-Wilson F. 2016. Multiyear greenhouse gas balances at a rewetted temperate peatland. *Glob Change Biol*, 22: 4080–4095
- Xu J, Morris P J, Liu J, Holden J. 2018. Peatmap: Refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis. *Catena*, 160: 134–140
- Yu Z. 2011. Holocene carbon flux histories of the world's peatlands. *Holocene*, 21: 761–774
- Yu Z, Loisel J, Brosseau D P, Beilman D W, Hunt S J. 2010. Global peatland dynamics since the last glacial maximum. *Geophys Res Lett*, 37: L13402
- Zhao Y, Gong P, Yu L, Hu L, Li X, Li C, Zhang H, Zheng Y, Wang J, Zhao Y, Cheng Q, Liu C, Liu S, Wang X. 2014a. Towards a common validation sample set for global land-cover mapping. *Int J Remote Sens*, 35: 4795–4814
- Zhao Y, Tang Y, Yu Z, Li H, Yang B, Zhao W, Li F, Li Q. 2014b. Holocene peatland initiation, lateral expansion, and carbon dynamics in the zoige basin of the eastern Tibetan Plateau. *Holocene*, 24: 1137–1145
- Zhao Y, Yu Z, Zhao W. 2011. Holocene vegetation and climate histories in the eastern tibetan plateau: Controls by insolation-driven temperature or monsoon-derived precipitation changes? *Quat Sci Rev*, 30: 1173–1184

(责任编辑: 赵艳)