

文章编号: 1000-0585(2001)01-0120-09

全球变暖与湿地生态系统的研究进展

傅国斌, 李克让

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 湿地作为一种独特的生态系统是各种主要温室气体的“源”与“汇”, 因而在全球气候变化中有着特殊的地位与作用。另一方面, 全球气候变化又有可能对湿地生态系统的面积、分布、结构、功能等造成巨大的影响, 并有可能引起温室气体的源汇转化, 从而对气候系统形成反馈。本文综述了国内外这两个方面的研究进展, 指出了近期全球变化与湿地生态系统研究的重点方向和领域。

关键词: 温室气体; 全球变暖; 气候变化; 湿地; 生态系统

中图分类号: X171 **文献标识码:** A

由于大气中 CO_2 及其它温室气体 (CH_4 、 N_2O 等) 浓度的增加而导致全球变暖已成为全世界各国政府、科学界及社会公众所关切的问题^[1,2]。在过去的 100 年时间里, 全球平均气温明显上升, 刚刚过去的 1998 年是有记录的 100 多年来最热的一年。根据美国宇航局戈达德航天研究所的数据, 1998 年地球表面大气层平均温度达到 14.57 的新记录, 比 1997 年上升了 0.17 。如果大气中 CO_2 及其它温室气体的浓度增加一倍, 全球气温将会明显变暖, 这一点已经得到全世界大多数科学界的认同。虽然不同的科学家利用不同的模型对全球各地升温的幅度和范围还存在着不尽一致看法。至于何时大气中 CO_2 及其它温室气体的浓度增加一倍, 则取决于人们对这些气体减缓排放的措施实施。

全球变暖不仅使全球大气环流、气候带、洋流、风、降水、气温等气象气候因子出现明显的变化, 而且对全球的生态系统、作物产量、社会经济、乃至政治过程等都会产生一系列的影响。湿地作为地球上一种重要生态系统, 其组成、结构、分布和功能等都与气候因子休戚相关。因而, 全球变暖必将会影响到湿地生态系统。

1 湿地及其在全球变化中的作用

湿地是一种多功能、独特的生态系统, 根据《湿地公约》定义, “湿地系指不问其为天然或人工, 长久或暂时之沼泽地、湿原、泥炭地或水域地带, 带有或静止或流动, 或为淡水、半咸水或咸水水体者, 包括低潮时水深不超过 6 m 的海域^[3]”。我国学者常用的湿地定

收稿日期: 2000-05-19; 修订日期: 2000-08-16

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999043601) 和国家“九五”重点科技攻关项目 (96-908-03-03)

作者简介: 傅国斌 (1966-), 男, 山西临猗人, 副研究员, 在职博士。主要从事水文水资源的研究, 在《地理学报》、《地理研究》、《科学进展》等刊物上发表论文 20 余篇。

义为：陆地上常年或季节性积水（水深 2 m 以内，积水 4 个月以上）和过湿的土地，并与其上生长、栖息的生物种群构成的生态系统。常见的自然湿地有：沼泽地、泥炭地、浅水湖泊、河滩、海岸滩涂和盐沼等，人工湿地包括稻田、虾田、蟹田等。湿地类型多，面积大、分布广。据统计，全世界共有湿地 8.558×10^8 ha，占陆地总面积的 6.4%^[4]。

湿地对全球变化的贡献主要表现在以下几个方面：

1.1 湿地生态系统是 CO₂ 的“源”与“汇”

据估计，储藏在不同类型湿地内的碳约占地球陆地碳总量的 15%^[5]，因而，湿地在全球碳循环过程中有着极其重要的意义。据 Franzen 估计^[6]，世界上泥炭干物质总量为 $240 \times 10^9 \sim 280 \times 10^9$ t，如果按碳含量 50% ~ 55% 计算，储藏在泥炭中碳的总量将是 $120 \times 10^{15} \sim 260 \times 10^{15}$ g。湿地生态系统由于地表经常性积水，土壤通气性差，地温低且变幅小，造成好气性细菌数量的降低，而嫌气性细菌较发育。植物残体分解缓慢，形成有机物质的不断积累。泥炭是沼泽湿地的产物，是生态系统中有有机质积累速率较强类型之一，是 CO₂ 的“汇”。湿地经过排水后，改变了土壤的物理性状，地温升高，通气性得到改善，提高了植物残体的分解速率，而在湿地生态系统有机残体的分解过程中产生大量的 CO₂ 气体，向大气中排放，此时，湿地生态系统又表现为 CO₂ 的“源”。

1.2 湿地生态系统是甲烷 (CH₄) 的重要“源”

甲烷，CH₄，俗名沼气，产生于厌氧微生物活动。在厌氧条件下，甲烷菌分解土壤中的有机质，产生甲烷，同时，在好气土壤或土层中，甲烷又被氧化菌所氧化。由于甲烷是在厌氧条件下产生的，所以产生甲烷的土壤环境主要是各种类型的沼泽、较浅的水体及水稻田。据估计全球湿地每年约释放 150Tg (1 Tg = 1 000 000 t) 甲烷，约占每年大气总甲烷来源的 25%。在湿地和稻田中，甲烷产生和再氧化受温度、酸碱度、氧化还原电位和淹水深度的影响，并与植物生长密切相关。植物生长一方面是有有机物质的来源；另一方面，植物通气组织是土壤中甲烷进入大气，以及大气中氧气进入土壤的主要通道^[7]。根据王明星等人估计^[8]，1988 年我国稻田 CH₄ 排放量约为 $17 \pm 2 \times 10^{12}$ g，约占全国 CH₄ 总排放量 $35 \pm 10 \times 10^{12}$ g 的一半。各种天然湿地的排放量约为 2.2×10^{12} g，约占总排放量的 6% 左右。甲烷生产与湿地类型、水分状况、温度、土壤理化特征等因素有关。

1.3 湿地生态系统是氧化亚氮 (N₂O) 的“源”

氧化亚氮 (N₂O) 是仅次于 CO₂ 和 CH₄ 的温室气体。大气中 N₂O 的 95% 来源于生态系统氮循环中的硝化和反硝化过程。高温、湿润、高碳氮含量的土壤是 N₂O 产生的最佳环境。随土壤水分含量的增加，N₂O 产生的速率出现高峰，但土壤含水量达到饱和以后，N₂O 释放率会显著下降。N₂O 的排放源主要是土壤^[9]，其中农业土壤每年的释放量约 3×10^6 t，自然土壤为 6×10^6 t。由于土壤性质和覆盖状况等因素的差异，土壤排放 N₂O 的通量在时间和空间上变化很大。目前对 N₂O 的测定工作大部分是在森林（特别是热带森林）和各种农田上，而对于天然湿地研究的很少。

1.4 湿地开发对全球变化的影响

湿地曾经是受人类活动干扰较少的陆地生态系统之一，是许多生物种群的优良生境，存在着丰富的物种，堪称生物多样性的储存库，以我国湿地为例^[3]，湿地哺乳动物有 65 种，约占全国总数的 13%；湿地鸟类 300 种，约占全国鸟类总数的 26%；爬行类 50 种，约占全国总数的 13%；两栖类 45 种，约占全国总数的 16%；鱼类 1 040 种，约占全国总数的 37%

和世界淡水鱼总数的 8% 以上。中国湿地还有高等植物 1 548 种, 其中被子植物 1 322 种、裸子植物 10 种、蕨类植物 39 种、苔藓植物 167 种。湿地集土地资源、生物资源、水资源、矿产资源、旅游资源等于一体。但是在人类活动长期影响下, 特别是近年来湿地过度开发与利用的影响下, 湿地被不断围垦、污染和淤积, 面积日益缩小^[10], 物种逐渐减少。湿地生态系统的结构、功能、分布等的变化必然会对区域, 甚至更大范围的气候和气候系统造成一定的影响。

2 全球变暖对湿地的可能影响

虽然全球变暖对湿地生态系统影响的研究在国内外都很有限, 但可以肯定全球气候系统的变化必将对湿地生态系统造成极大影响, 这可以从以下几个方面来分析:

2.1 对湿地面积和分布的可能影响

虽然目前科学家还无法精确估算未来气候变化情景下, 全球湿地面积和空间分布的变化, 但确信气候变化一定会造成全球湿地面积及其时空分布的变化。Brock 和 Van Vierssen^[11], 曾经研究欧洲南部半干旱地区, 水生植物为主的湿地生态系统对气候变化的响应, 结果表明, 气温升高 3~4℃, 适应于水生植物生长的湿地面积在五年之内将减少 70%~80%, 这说明干旱半干旱地区的湿地对全球变暖是极为敏感的。Poiani 和 Johnson^[12] 曾经研制了一个水文和植被的响应模型, 来分析美国大平原地区半永久性湿地范围对全球变化的响应, 他们利用 GISS (Goddard Institute for Space Studies) GCM 模型的输出结果 (即气温升高 3~6℃, 降雨从减少 17% 到增加 29%), 进行 11 年模拟, 其结果表明, 在目前的气候状态下, 湿地面积将增加 3%; 但在温室气体气候情景下, 湿地面积将减少 12%, 开放水域的面积也由模拟初期的 51%, 降至第四年的 0%。张翼^[13] 等曾经研究气候变化对东北地区植被分布的可能影响, 在六种气候情景下 (降水增加/减少 10%, 温度增高 1、2 和 3℃), 东北地区草本沼泽的面积都在减少。气候变化对北方泥炭地影响的另一种可能是高温将使永久冻土融化。如果温度增加 2℃ 左右, 北半球冻土的南部边界将北移。这不仅改变区域的水文和地貌特征, 而且与碳循环的过程和速率有关, 特别是在极地、亚极地区域, 因为冻土是维持此地区生态系统中水位的重要因子。

在遭受气候变化影响的同时, 湿地也面临着日益严重的人类活动威胁。我国湿地面积大约有 $7.0 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占国土面积的 2.6%, 其中包括 $1.1 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 沼泽, $1.2 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 湖泊 (自然及人工), $2.1 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 滩涂和盐沼地, 以及 $3.2 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 的稻田。受人类活动和气候变化等各种因素的影响, 湿地面积已大大缩小。Scott 等人^[14] 收集的资料显示, 中国 71% 的湿地都已经受到人类活动的威胁, 39% 的湿地将受到日益严重的威胁。农业开垦和城市开发是中国湿地面积减少的主要原因, 珠江三角洲、长江中下游平原的湿地, 自古以来就是开垦种植水稻的对象; 三江平原的湿地目前正是开垦的对象。据估计^[3], 中国天然的湖泊已从 50 年代的 2 800 个下降到 80 年代的 2 350 个, 其面积减少了 11%。水土流失引起河床和湖泊的泥沙淤塞, 也造成湿地面积的减小, 这不仅仅发生在中国北方, 而且在南方地区也非常严重, 如洞庭湖每年约有 $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的泥沙沉积湖泊, 致使这个原为中国最大的淡水湖由本世纪初的 $4 350 \text{ km}^2$ 萎缩到现在的 $2 500 \text{ km}^2$ 左右^[3]。水污染也是人类活动对湿地影响的一个重要方面, 快速的工业发展意味着污染的不断加剧, 对湿地质量的威胁也

就越来越大^[15]。对湿地生物资源的过度利用和不合理开发，严重破坏了湿地生态系统的平衡和湿地生物多样性，许多湿地的生物量因此大幅度下降。

2.2 对湿地水文情势和浅水湖、内陆湖的可能影响

全球气候变化不仅使得降水、气温、云量等气候参数发生明显变化，而且会对全球水文循环过程和区域水文情势产生深刻的影响。最近国内外的研究都表明^[16~18]，区域水资源状况与降雨、气温等之间是一种非线性的关系，也就是说相对较小的降雨和气温变化将导致水资源状况的较大变化，例如，若降水量减少 10%，气温增加 2℃，河川径流量一般要减少 15%~35%左右。施雅风等人的研究表明^[19]，自 50 年代以来，我国西北地区的内陆湖绝大部分均向萎缩的方向发展，有的甚至干涸。除人类活动影响外，暖干化的气候是重要的原因。如果未来气候变暖，而河川径流变化不大的情景下，平原湖泊由于水体蒸发加剧，将会加快萎缩，并逐渐转化为盐湖。湿地生态系统水文情势的改变，也将对湿地生态系统的生物、生化、水文等功能产生影响，继而影响湿地生态系统的社会和经济功能。但是，由于湿地类型复杂，各种类型湿地水分状况存在明显差异，各地区/区域水资源情势对全球变暖的响应亦明显不同等原因，湿地生态系统对全球气候变化不仅表现出明显的区域性，而且在同一区域，不同湿地类型的响应也不尽相同。

许多研究^[20~22]都表明，水文参数是控制湿地生态系统结构和功能的关键因子，因此湿地水文情势的变化必然会影响到湿地生态系统结构和功能的时空格局。

2.3 对湿地生态系统结构和功能的影响

与陆地生态系统相比，湿地的生物多样性较为丰富，它为多种无脊椎动物、冷血和热血的脊椎动物提供栖息和繁衍的场所^[23,24]。湿地最为基本的功能之一就是为动物提供终年的居住环境，还是一些候鸟越冬的生境（取决于湿地的地理位置）^[25~27]。因而，湿地生物多样性也将受到全球变化的影响。但是，由于气候和水文要素的时空变异性，地质地貌的区域差异，湿地中的生物群落存在着极为明显的时空分异性，各地湿地生态系统功能对全球变化的响应也表现出极大的区域性。在一些湿地，气候变化引起的生物群落的变化，有可能导致一些种群的变化（如有的种群可能会逐渐消失，有的种群则会产生产新的变种），例如，在塞舌尔，小面积湿地的丧失，有可能造成当地爬行类和小型鸟类的灭绝^[26]。在半干旱地区，鸟类对于湿地的依存程度存在着明显的年际变化，这主要取决于区域年降水量。如果塞舌尔西部的湿地变干，一些依赖湿地生存，而且相对容易迁移的鸟类将会东移，例如，迁移至尼日尔、尼日利亚、喀麦隆、乍德等国^[28]。由于湿地，尤其是温暖地区的季节性湿地，为许多严重疾病，如疟疾、丝虫病、血吸虫病等的病媒的繁殖和生长提供了栖息地，所以温度的升高和季节湿地分布的变化将改变这些疾病的时空分布。防洪作为湿地的基本功能之一^[29]也会受到全球变暖的直接和间接影响。

2.4 对湿地生态系统的温室气体源汇的影响

由于地下水位下降，气温升高，有些湿地中原来不参与全球 C 循环的 C 也变得活跃起来，将会由 CO₂ 的“汇”变成“源”，这种汇源之间的转化已经在一些极冷的地区发生了。气候变化对湿地水文情势的影响亦会明显影响到湿地 CH₄ 排放的数量及历时，如果湿地变干，则 CH₄ 的排放量会有所减少。自然湿地甲烷释放量变化取决于它们对全球气候变化的响应^[6]，温度升高可以增强甲烷细菌的活动强度，从而增加甲烷释放量，但它同时会降低土壤含水量和地下水位，导致甲烷释放量下降。据估计^[6]，北半球高纬度地区湿地的地下水位

随温度升高而下降, 甲烷释放量降低, 甚至一些湿地变干, 转为消耗大气中的甲烷。泥炭在湿地中的形成与积累主要受控于气候条件, 因而气候变化必将导致湿地生态系统和大气之间的碳通量变化, 而碳通量的变化又会对全球气候变化形成反馈。研究结果表明^[1], CH₄ 通量对温度变化响应适中, 而对水分变化的响应敏感 (表 1)。

表 1 北半球湿地 CH₄ 通量对温度和水分响应^[1]

Tab. 1 Potential changes in CH₄ flwx from norehern wetland due to changes in the thermal and moisture regime

试验的简单描述	温度和水分的变化	实测或模型 CH ₄ 通量的变化	敏感性
Alaska 北坡苔原湿地不同温度和水分下 CH ₄ 通量的观测结果 ^[30]	T+ 4 T+ 4 ; 变湿 T+ 4 ; 变干	4 倍增加 4~5 倍增加 2 倍增加	对增温明显敏感; 对水分变化相对小的响应。
Alaska 永久冻土区湿地 CH ₄ 通量的观测结果 ^[31]	温度和水分 4 年的变化	通量在暖湿 条件下增加	对增温和水分变化均明显敏感。
加拿大北部干湿地的 CH ₄ 通量的观测结果 ^[32]	地下水位下降 10 cm 地下水位下降 > 10 cm	通量消除 由源变汇	对水分变化明显敏感。
芬兰北部干湿地的 CH ₄ 通量的观测结果 ^[33]	地下水位下降 4 cm 地下水位下降 20 cm	5 倍减少 通量消除	对水分变化明显敏感。
5 个高纬湿地 20 世纪不规则夏季温度中温度和 CH ₄ 通量的回归模型 ^[34]	T ± 4	± 15% 的通量变化	对温度适度敏感
利用温度/CH ₄ 通量和水位/CH ₄ 通量的回归模型模拟加拿大北部沼泽对 CO ₂ 加倍的响应 ^[35]	T+ 0.8 T+ 2 地下水位下降 14 cm	5% 增加 15% 增加 80% 减少	对温度适度敏感; 对水分明显敏感。

2.5 海平面上升对沿海湿地的可能影响

全球变暖将会影响到海洋的热量收支状况, 从而导致海平面上升, 极地和寒带冰川由于全球变暖而加大融化的力度。据推测到 2050 年, 全球海平面将会增加 30~50 cm, 而到 2100 年, 全球海平面将上升 1 m。而在过去的 100 年中, 全球海平面变化的观测资料与全球平均气温的关系也证实了这一点。随着过去 100 年全球平均气温明显增高, 全球海平面也出现了明显的上升的趋势。Peltier 和 Tushingham^[1] 在研究了全球海平面上升与温室效应之间的关系后, 认为在过去的 100 多年里, 全球海平面以 2.4 ± 0.90 mm/a 的速度上升。施雅风等^[36] 也曾对近百年来世界海面变化作了分析, 其结果与上述结果基本一致, 认为近百年来世界海面上升量约为 10~15 cm, 其中 7~12 cm 可以归功于气候变暖, 其余 3 cm 则为验潮站沉降所致。海平面上升, 将会对沿海岸地带产生极大的影响, 例如有的地带可能会被淹没, 一大批城市、农田、道路等将全遭到破坏, 海水倒灌将会引起严重的环境污染等。沿海地带的湿地系统, 无论其分布和面积, 还是其结构与功能都将会随之发生很大的变化。

海平面升高有可能使沿海湿地分布状况发生极大变化。咸及微咸的滩地、红树林和其它沼泽会在水淹和冲蚀中消失; 其它湿地将会变性或向内陆移动。这些沿海湿地作为野生

动物栖息地的价值将削弱,生物多样性也会减少。湿地对沿海地区的生态和经济是至关重要的,它们的生产率等于或超过任何自然或农业系统。湿地还起到净化污染物和一定程度上阻拦洪水、风暴和高潮的作用。无疑,沿海湿地的变化必然影响人类社会和经济的发展。气候变化和海平面上升,以及风暴和风暴潮的变化会侵蚀河岸、增加港湾和淡水区的盐度、改变河流和海湾的潮汐范围、影响沉积和营养物的输送、并增大沿岸洪涝灾害的频率。一些沿海湿地,如咸水沼泽、河口三角洲等目前和未来正受到特别的风险,而这些系统的变化又会对旅游业、淡水供应、渔业、生物多样性产生重大的负面影响^[1]。

3 全球变暖对湿地生态系统影响的研究展望

由于湿地生态系统自身的复杂性,湿地生态系统与气候因子及其它环境因子之间的错综关系。因此,湿地生态系统对全球变暖响应的研究目前在全球范围内都是初步的,存在着许多的不确定性,因而,是未来全球变化研究中的一个重要方面。具体来说,以下几个方面将可能是此研究领域近期的重点方向:

3.1 CO₂ 等温室气体浓度增加对湿地生态系统的直接影响

大气中 CO₂ 浓度增加会提高湿地生态系统中植物叶表面的 CO₂ 浓度梯度,使得 CO₂ 容易进入叶片内部而提高光合速率。光合途径不同的植物,其光合强度对 CO₂ 浓度响应曲线有显著差异。CO₂ 浓度增加提高光合效率对湿地生态系统生物量亦造成影响。根据国内外的研究,CO₂ 增加,多数作物取得明显的增产效应(如小麦、大麦、水稻等),但对湿地生态系统生物量的影响还未见详细报道。CO₂ 增加的直接效应的另一个方面是影响植物水分利用效率。植物叶片的气孔是 CO₂ 和水汽进入植物的窗口,CO₂ 增加会减小气孔的开度,从而降低蒸腾量,减少需水量,提高水分利用率。2 × CO₂ 后可使 C₃、C₄ 类植物的气孔孔径减少 40%,降低蒸腾量 23% ~ 46%^[37]。目前,此方面的研究大都集中在农田生态系统中,而对湿地生态系统的研究还较少,因而是未来全球变化对湿地生态系统研究的重要内容之一。

3.2 湿地生态系统中碳、氮循环的研究

湿地生态系统中碳、氮等元素的循环过程不仅与大气中 CO₂、CH₄、N₂O、NO_x 等气体的浓度、水分和能量收支状况、湿地生态系统的组成与结构等因素有关,而且与气候因子(如降水、气温、辐射等)休戚相关。但目前这种关系的认识多为定性分析,缺乏定位定量研究,因此,从环境建设和经济发展的需要出发,有待于加强湿地生态系统中碳、氮等元素的循环过程及其主控因子之间的关系研究。

3.3 湿地生态系统动力学模型的发展与应用

确定湿地生态系统对全球变暖的影响涉及到许多不同层次的复杂系统,一种有效的方法是利用生态系统的动力学模型来处理这种复杂的系统。尽管现在已经有一系列的生态模型被不同的学者用于全球变化对生态系统影响的研究,但大都适用了森林、草地、农田等生态系统,而直接用于湿地生态系统的模型还很少。同时,还需要从模型参数的率订和修改、模型物理结构的细化、模型精度的评估等几个方面进行深入研究。湿地模型主要包括湿地生态模型、湿地化学模型和湿地形态模型等三大类,按其抽象的对象可以细分为能量循环模型、物质循环模型、水文学模型、空间场生态模型、植物生长模型、因果关系模型、区域综合模型等^[38]。

3.4 湿地生态系统的阈值研究

正如气候变化框架公约指出,气候的变化及其不利的影 响是人类共同关心的问题。所谓气候变化的不利影响是指气候变化所造成的自然环境或生物区系的变化,这些变化对自然的和管理下的生态系统的组成、复原力、生产力,或对社会经济系统的运作,或对人类的健康和福利等产生重大且有害的影响。因此,探讨和寻求造成湿地生态系统有害影响的阈值是极为重要的课题。当年/月平均气温或最低气温高于某一特定值时,某些物种便存在着可能灭绝的危险,此时的温度便可以称为此物种对全球变暖响应的阈值。显然,不仅温度可以是阈值的一个指标,降水、土壤水分、养分等诸多环境因子都可成为阈值。不同湿地生态其阈值显然是有区别的。

3.5 极端事件对湿地生态系统的影响

利用特有的历史文献、树木年轮、冰芯和古气候资料及数据,分析历史时期气候变化对极端气候事件影响,例如旱、涝、高温、病虫害等发生的频次、幅度、范围和强度等,继而探讨这些气候极端事件发生时,湿地生态系统的响应,从而为未来全球变暖情景下,气候极端事件发生的估计以及有可能对湿地生态系统带来的影响的评估提供依据。

3.6 全球变暖对湿地生态系统的综合研究

目前,全球变暖对湿地生态系统的研究,往往只是考虑温度、降水等气象因子对生态系统结构、组成、分布、功能的影响。事实上,这种影响是十分复杂而多变的,例如,温室气体可能对湿地生态系统中物种的光合作用造成直接影响,再比如,全球变暖有可能改变害虫的数量和种类,从而对湿地生态系统造成影响。认真分析全球变暖对湿地生态系统影响的各个方面和层次,探讨其物理机制和反馈机理,对此问题进行综合和深入的研究,是此研究领域所面临的核心课题。

3.7 适应性对策研究

全球变暖对湿地生态系统的影响有正负两个方面。如何采取积极而有效的措施,降低或减缓其负面效应,增大和加强其正面效应是全球变化中极其重要和不可缺少的组成部分。

参考文献:

- [1] Houghton J T et al. Climatic Change 1995: The Science of Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [2] 李克让. 全球气候变化及其影响研究进展和未来展望[J]. 地理学报, 1996, 51(增刊).
- [3] 国家环境保护局主持. 中国生物多样性国情研究报告编写组 编. 中国生物多样性国情研究报告[M]. 中国环境科学出版社, 1998.
- [4] 王宪礼, 李秀珍. 湿地国内外研究进展[J]. 生态学杂志, 1997, 16(1): 58 ~ 62.
- [5] 吕宪国, 何岩, 杨青. 湿地碳循环及其在全球变化中的意义[A]. 见: 陈宜瑜 主编. 中国湿地研究[C]. 吉林科学技术出版社, 1995.
- [6] Franzen L G. Can earth afford to lose the wetlands in the battle against the increasing greenhouse effect? [A]. International Peat Society Proceedings of International Peat Congress[C]. Uppsala, 1992. 1 ~ 18.
- [7] 曹明奎, 李克让. 陆地生态系统与气候相互作用的研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(4): 446 ~ 452.
- [8] 王明星 等. 中国 CH₄ 排放量的估算[J]. 大气科学, 1993, 17(1).
- [9] 王敬国. 农业生态系统和大气间的温室气体交换[J]. 环境科学, 14(2): 49 ~ 53.
- [10] 黄进良. 洞庭湖湿地的面积变化与演替[J]. 地理研究, 1999, 18(3): 297 ~ 304.
- [11] Brock T C M, Vierrsan W V. Cliamtic change and hydropte-dom inated communities in in land wetland ecosystem

- [J]. *Wetland Ecology and Management*, 1992, 2: 37~49.
- [12] Poiani K A, Johnson W C. Potential effects of climate change on a semi-permanent prairie wetland, *Climatic change*[J], 24: 213~232.
- [13] 张翼, 宋俊果. 气候变化对东北地区植被分布的可能影响[A]. 见: 张翼 等主编. 气候变化及其影响[C]. 北京: 气象出版社, 1993.
- [14] 马敬能 等编著. 吕晓平 译. 中国生物多样性保护综述[M]. 中国林业出版社, 1998.
- [15] 邓伟, 何岩, 宋新山 等. 松嫩平原西部盐沼湿地水环境化学特征[J]. *地理研究*, 2000, 19(2): 113~119.
- [16] 傅国斌, 刘昌明. 气候变化对区域水资源影响的初步分析——以海南岛万泉河为例[J]. *地理学报*, 1991, 46(3): 277~289.
- [17] 邓慧平, 吴正方, 唐来华. 气候变化对水文、水资源影响研究综述[J]. *地理学报*, 1996, 51(增刊).
- [18] 沈大军, 刘昌明. 水文水资源系统对全球变化的响应[J]. *地理研究*, 1998, 17(4).
- [19] 施雅风, 张祥松. 气候变化对西北干旱区地表水资源的影响和未来趋势[J]. *中国科学(B辑)*, 1995, 25(9).
- [20] Gosselink J G, Turner R E. The role of hydrology in freshwater wetland ecosystem[A]. In: Good R E, Wigham D, Simpson R L (eds). *Freshwater Wetland-ecological Processes and Management Potential* [C]. Academic Press, Inc., New York, 1978. 63~78.
- [21] Novitzki R P. Wetland hydrology[A]. In: Majumdar S K, Brooks R P, Brenner F L et al (eds). *Wetlands Ecology and Conservation: Emphasis in Pennsylvania* [M]. The Pennsylvania Academy of Sciences Publ., Philipsburg, 1989. 377~388.
- [22] Kangas P C. Long-term development of forested wetland[A]. In: Lugo A E, Brinson M, Brown S (eds). *Ecosystems of the World. Vol. 15, Forested Wetlands*[C]. Elsevier Sci. Publ. New York, 1990. 25~51.
- [23] Gosselink J G, Maltby E. Wetland losses and gains[A]. In: Williams M (eds). *Wetland: A Threatened Landscape*[M]. Basil Blackwell Ltd., Oxford, UK, 1990. 296~322.
- [24] Clark J. Freshwater wetlands: habitats for aquatic invertebrates, amphibians, reptiles, and fishes[A]. In: Greeson P E, Clark J R (eds). *Wetland Function and Values: the State of Our Understanding*[M]. American Water Resources Association Technical Application, Minneapolis, MN, USA, 1979. 330~343.
- [25] Bellrose F C, Trudeau N M. Wetland and their relationship to migrating and winter populations[A]. In: Hook D D et al (eds). *The Ecology and Management of Wetlands, Vol. 1*[C]. Timber Press, Portland, OR, USA, 1988. 183~194.
- [26] Dugan P. *Wetlands in Danger*[M]. Reed International Books Ltd, Singapore, 1993.
- [27] Gibbs J P. Importance of small wetland for the persistence of local populations of wetland associated animals[J]. *Wetland*, 1993, 13: 25~31.
- [28] Rose P M, Scott D A. Waterfowl population estimates[R]. IWRB Publ. No. 29. International Waterfowl and Wetland Research Bureau, Slimbridge, UK, 1994.
- [29] 吴炳方, 黄进良, 沈良标. 湿地的防洪功能分析评价——以洞庭湖为例[J]. *地理研究*, 2000, 19(2): 189~193.
- [30] Livingston G P, Morrissey L A. Methane emissions from Alaskan arctic tundra in response to climate change[A]. In: Weller G, Wilson C L, Severin B A (eds). *International Conference on the Role of Polar Regions in Global Change*[C]. Geophysical Institute and Center for Global change and Arctic Ecosystem Research, University of Alaska, Fairbanks, Alaska, USA, 1991. 372~394.
- [31] Whalen S C, Reeburgh W S. Interannual variations in tundra methane emissions: a 4-year time series at fixed sites[J]. *Global Biogeochem. Cycles*, 1992, 6: 139~159.
- [32] Roulet N T, Ash R, Quinton W et al. Methane flux from drained northern peatlands: effects of a persistent water table lowering on flux[J]. *Global biogeochem. Cycles*, 1993, 7: 749~769.
- [33] Martikainen P J, Nykanen H, Crill P M et al. The effect of changing water table on methane flux from two Finnish mire sites[J]. *Suo*, 1992, 43: 237~240.
- [34] Harriss R C, Frolking S. The sensitivities of methane emissions from northern freshwater wetlands to global warming[A]. In: Forth P, Fisher S (eds). *Climate Change and Freshwater Ecosystem*[C]. Springer Verlag,

New York, 1992. 48 ~ 67.

- [35] Roulet N T, Moore T R, Bubier J et al. Northern fens: methane flux and climate change[J]. *Tellus*, 1992, 44 (B): 100 ~ 105.
- [36] 施雅风, 范建华. 中国气候与海面变化研究的若干进展[A]. 见: 施雅风 等主编. 中国气候变化与海面变化研究进展(一)[C]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [37] Cure J D, Acock B. Crop response to carbon dioxide doubling: a literature survey[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 38: 127 ~ 145.
- [38] 殷康前, 倪晋仁. 湿地研究综述[J]. *生态学报*, 1998, 18(5): 539 ~ 546.

Progress in the study on the relationship between global warming and wetland ecological system

FU Guo-bin, LI Ke-rang

(Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: This paper reviews the recent progress in the study on the relationship between global warming and wetland ecological system from three aspects. (1) The wetlands are both sources and sinks of the major trace gases, such as CO₂, CH₄, N₂O, NO_x etc., hence they have a close relation with greenhouse effect and contribute a great deal to the global warming. (2) Global warming will affect the areal extent and distribution of wetlands—— although at present it is impossible to estimate future areal size and distribution of wetlands from climate-change scenarios—— and the cycling of carbon in wetlands. As a result some carbon-sequestering wetlands might change from CO₂ sinks to sources due to a lowering of water table or temperature rise. The hydrological regime changes resulted from global warming and/or other disturbance that change the vegetation types in wetland areas will affect other wetland functions as well. (3) Wetlands are highly valued in many areas. The lack of data to fully address their responses to global warming/ climate change calls for several areas of research in the future. These include site- specific experiments on the direct responses of trace gases on wetland ecological system, the feedback on climate by changes in trace gases flow from wetlands, models suitable for the study, comprehension study on this issue, and adaptation, conservation and rehabilitation of wetlands in response to global warming.

Key words: wetland; ecological system; trace gases; global warming; climate change