

根据古生态记录制定湿地生态恢复目标的研究展望

刘汉向^{1,2}, 高传宇¹, 于晓菲¹, 张振卿¹, 王国平^{1*}

(1. 中国科学院湿地生态与环境重点实验室, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:介绍了湿地生态恢复中基准环境和弹性理论相关概念,对制定湿地生态恢复目标的主要方法进行了回顾,重点探讨了基于古生态记录制定湿地生态恢复目标的技术路线:根据湿地现代生态调查,建立生物指标与环境因子转换函数;通过对湿地沉积记录中生物指标的分析,重建湿地历史时期植物、水位、水环境要素等;结合历史资料和湿地沉积记录,确立未受人类活动扰动的湿地生态状况,以此作为湿地恢复的基准环境;参照弹性理论,制定湿地生态恢复目标。

关 键 词:湿地生态恢复目标;古生态记录;基准环境;生态系统弹性

中图分类号:X171.4;Q91 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-5948(2016)04-568-08

湿地是地球上陆地和水域相互作用所形成的独特生态系统,生物多样性丰富,在调节径流、净化水质、美化环境、改善气候和维护区域生态平衡等方面有着其它生态系统所不能替代的作用。然而,工业革命之后,随着科技的发展和人口的剧增,人类活动强度明显增强,并逐渐成为影响生态系统结构和功能的主导因素,且已经对生态系统造成了严重的影响^[1]。如果按照目前人类活动的强度,而不对湿地加以保护和修复,那么湿地的结构和功能将急剧恶化,从而造成不可估量的后果。

目前,政府部门和科研工作者已经意识到对湿地生态系统的保护和恢复的重要性^[2,3],全球许多国家和地区的湿地生态恢复实践取得了一定的进展。但从制定湿地生态恢复目标的方法上看,常用的历史记录方法、参考点方法等有一定的缺陷,湿地恢复的效果与人们的预期还有一定距离,需要在制定湿地生态恢复目标的理论方法和实践应用中进行深入探讨。基于湿地沉积物中的古生态记录,本文提出利用现代生态学和古生态学结合的方法,考虑湿地的自我恢复能力,制定湿地生态恢复目标。

1 湿地生态恢复目标

湿地生态恢复是指通过生态技术或生态工程

手段,对退化或消失的湿地进行修复或重建,再现干扰前的结构和功能,以及相关的物理、化学和生物学特征,使其发挥应有的作用^[4]。湿地生态恢复的关键问题就是要制定湿地恢复的目标,也称参考条件(reference conditions),通常根据该湿地未受到人类活动影响或者人类活动影响较小时期的生态特征,即基准环境(baselines)。对湿地基准环境的构建,学者们通常基于该湿地被改变之前的植物、水位及水环境要素等^[1]。

在制定恢复目标的过程中,在参照生态系统基准环境的同时,通常应考虑生态系统的弹性(resilience)以及人工恢复成本^[5]。生态系统的弹性是指生态系统受到较轻程度的破坏时,在没有外界条件干预的情况下可以自然恢复,即生态系统的自我恢复能力(图1)^[6]。与弹性相联系的是生态系统的抵抗力(resistance),是指系统接受干扰以后保持原有属性的能力^[7]。“弹性”一词最早被加拿大学者霍林(Holling C S)创造性的引入到生态系统稳定性的研究中,并把其定义为系统受到干扰以后仍能维持其功能、结构和反馈的能力^[8],之后几十年来,经过大量的案例研究,这一术语在概念和内涵上变得更加丰富与完善。韦伯斯特(Webster J R)等认为“弹性”是生物群落和生态进程遭受到破

收稿日期:2015-10-27;修订日期:2015-12-23

基金项目:国家自然科学基金项目(41571191和41271209)和国家重大科学研究计划项目(2012CB956100)资助。

作者简介:刘汉向(1989-),男,河南省濮阳人,博士研究生,主要从事湿地演化与生态恢复研究。E-mail: liuhanxiang@iga.ac.cn

*通讯作者:王国平,研究员。E-mail: wangguoping@iga.ac.cn

坏后能够自身恢复的能力^[9],此定义与韦斯特曼(Westman W E)提出的“抵抗力”概念并称为“Westman-Webster definition”^[10]被广泛接受,作为生态系统在受到干扰后的不同描述,在一系列领域中得到应用。弹性有一定的阈值,越过这个阈值,系统就很难(某些情况下甚至不可能)再恢复到原来的状态^[11]。如果对已经破坏的自然生态环境进行人工修复,则生态系统的结构和功能将逐渐恢复到生态系统弹性的阈值,依靠自身的恢复能力,可以逐渐恢复到干扰前的状态(图2)。

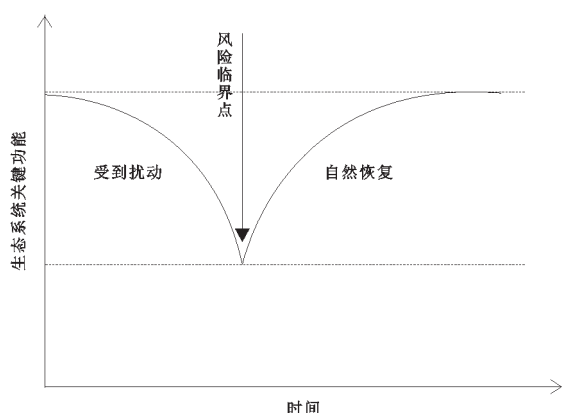


图1 生态系统弹性理论^[6]示意图

Fig.1 Sketch map of the resilience theory of ecosystem^[6]

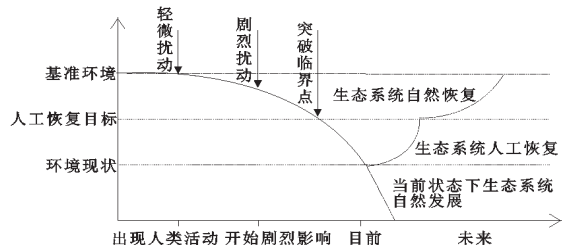


图2 湿地生态系统现状及发展模式

Fig.2 The present situation and development model of wetland ecosystem

2 制定湿地生态恢复目标的方法

湿地研究者在制定湿地生态恢复目标的技术和方法上做了一些有意义的尝试,诸如历史记录方法、参考点方法和古生态方法等,并相继将这些方法应用于湿地生态恢复的工作中,为湿地生态恢复目标的制定提供了参考依据。在湿地恢复的实践中,两种或多种方法的相互补充和验证更有助于湿地生态恢复目标的制定。

2.1 历史记录方法

在湿地生态系统被干扰或破坏的历史过程中,人们记录的一些信息和数据,如照片、土地调

查记录、土地管理和利用记录、火烧记录、水文记录、天气记录以及口口相传的历史故事等,可以在一定程度上反映生态系统历史时期的演变过程、土壤基质、水文状况等^[12]。休斯(Hughes R M)等在寻找和评估湖泊中鱼类群落完整性指数时,曾利用历史记录方法有效地构建了湖泊生态系统的基准环境^[13]。美国湿地恢复联合工作小组通过航拍照片、历史地图,以及从当地水利部门、大学和公民手中,获得了研究区早期详细的植物和水文数据^[5]。如果湿地未受人类活动影响前的水文、土壤和生物数据足够,这些信息就可以部分的或者完全的重建湿地生态系统的基准环境,制定出湿地的生态恢复目标。

利用历史记录方法,可以直观地获取湿地历史时期的植物、水文和土壤等数据,是较理想的恢复目标制定方法。然而在大多数情况下,由于历史信息的缺失,并没有足够详细的背景数据以构建湿地基准环境,因此,历史记录方法在制定恢复目标的应用中有很多局限。通常将其与其它措施相结合,如参考未受干扰区域的生态特征、建立模型和专家决策等^[14],可以取得不错的效果。

2.2 参考点方法

由于历史信息的缺失,大部分湿地工作者依赖于当地现存的“参考点”,即当地改变最少的天然湿地景观,作为制定恢复目标的参考,该方法被称为参考点法(reference-site approach)^[15,16]。参考点的生态特征通常是当地自然条件的反映,因此有一定的参考性。在对黄河三角洲湿地进行生态恢复时,参考湿地核心区的生态特征,构建了湿地恢复目标^[17],核心区是湿地保护区内没有或很少受到过人类干扰的区域,具有较大的参考价值。另外,选取多个参考点,增加样本量,可以使恢复目标的制定更加合理、准确。爱尔兰环境保护局对76个未受人类活动影响的贫营养或中营养湖泊进行了调查,分别评估这些湖泊的生态特性,通过对比,来选择最合适的参考点^[18],这比只用一个参考点构建的基准环境显然更具有说服力。因此,在湿地生态系统中寻找参考点时,如果条件允许,也应选择多个符合要求的天然湿地,然后在其中进行筛选。

假定参考点是一个未受人类活动扰动的生态系统,其生态特征可以被认为是恢复湿地的基准环境。然而,参考点方法并未考虑到生态系统的

自然演替进程,因此无法有效评估所参照的生态系统是否处在一个相对稳定的状态。除此之外,当选择的参考点过去受到过某些未知的较严重的干扰时,则不宜使用参考点方法^[19]。

2.3 古生态方法

2000年,欧盟水框架指令(Water Framework Directive, WFD)针对湖泊生态恢复,提出通过古生态学手段寻找一个没有受到工业化、城市化和农业活动影响的湖泊,同时此时期湖泊水体中的理化环境、生物组成受到的扰动非常小,以此时期的湖泊生态系统特征构建基准环境,进而制定湖泊的生态恢复目标^[1]。之后,古湖沼技术成为制定湖泊恢复目标的主要手段之一^[14,20]。泥炭地独特的原地自沉积模式,保证了泥炭沉积序列不像湖泊沉积序列那样容易受到再沉积的干扰^[21],因此基于古生态记录制定湿地恢复目标同样具有可行性。湿地中植物残体、孢粉、有壳变形虫等古生态记录研究发展迅速,然而基于古生态记录制定湿地恢复目标的研究相对较少^[22],目前学者们已经开始重视这方面的研究,牛津大学的科尔(Cole L E S)等就在马来西亚的热带森林泥炭沼泽中,利用花粉和炭屑等古生态记录,重建了泥炭沼泽历史时期的古植被以及所受到的干扰,并构建了湿地的基准环境,为该泥炭沼泽的恢复提供了技术支持^[23]。

通过古生态学的研究,可以对过去千年尺度的生态系统演化以及与人类活动之间的关系进行评估,其评估结果有助于了解人类和生态系统的关系,以及导致生态系统变化的驱动力^[24,25]。因此,可以利用古生态学手段,去寻找历史时期未受人类活动扰动的湿地生态系统状态,作为湿地生态系统的基准环境,进而服务于湿地恢复目标的制定。

3 制定湿地生态恢复目标的技术路线

基于古生态记录,制定湿地恢复目标的技术路线为:首先,应该在湿地中进行现代生态调查,建立生物指标与环境因子转换函数;基于古生态记录,利用转换函数对湿地历史时期的生态特征进行重建;通过对沉积记录及历史考古资料的综合分析,判别历史时期人类活动对湿地生态系统的影响程度,进而确立未受人类活动扰动的典型类型湿地的生态特征,以此作为湿地恢复的基准

环境;在对生态系统的弹性力进行评估后,选择基准环境与弹性阈值之间的湿地生态特征作为恢复目标(图3)。

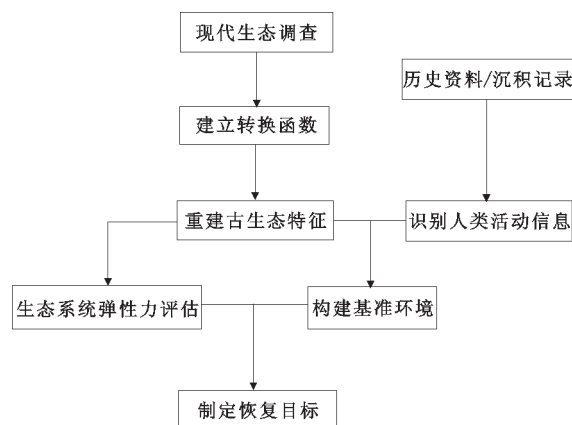


图3 湿地生态恢复目标制定的技术路线

Fig.3 The constructing process of reference conditions for wetland restoration

3.1 湿地现代生态调查

湿地的现代生态调查是为了明确生物指标与环境因子之间的关系,找出影响物种组成变化的关键环境因子,进而建立转换函数。湿地中的植物受到水位、营养、地形等多种环境因子的制约,水文条件是影响湿地植物分带的主要因素^[26]。植物通过留在湿地中的有机质改变湿地土壤导水率,反过来影响水位的变化^[27]。对长白山区泥炭沼泽的研究中发现,水位埋深是影响苔藓植物生态位的主要环境因子之一^[28]。娄彦景等通过在三江平原沼泽湿地中的大量生态调查,统计了湿地常见植物的生境水深^[29]。除了调查湿地植物与水位的关系之外,还应该调查表层硅藻、有壳变形虫等生物指标与水环境特征的关系。

3.2 建立生物指标与环境因子转换函数

利用现代生物与环境因子数据集,通过合理的数理统计方法,分析找出影响生物群落结构变化的主要环境因子,排序方法是研究生物指标组成与环境因子关系的直观、有效的方法^[30]。理论上,在一定研究区域内,只要生物的分布反映某种环境梯度,并且通过了显著性检验,就可以进行生物与该环境因子的转换函数推导^[31]。转换函数方法是一种被广泛使用的,通过现代生态学的研究,构建生物物种组合特征与环境因子的定量关系模型的一种有效方法^[32]。在一定的区域内,硅藻与总磷含量、pH、盐度之间和有壳变形虫与水位、pH

之间都可以建立转换函数。

3.3 重建湿地古生态特征

3.3.1 重建湿地植被演替序列

植物残体是死亡的植物由于未完全分解而在湿地沉积物中的残留,具有原位沉积的特点。1978年,范·吉尔(Van Geel B)率先利用植物残体,重建了荷兰Engbertsdijksveen地区近千年来的植被变化^[33]。通过植物残体重建的历史时期植被组成,可以作为当地湿地管理中湿地植被恢复的一个参考标准^[34]。通常采用英国南普顿大学地理系教授巴伯(Barber K E)综合前人的方法提出的QL-CMA(Quadrat and Leaf Count Macrofossil Analysis)分析方法^[35]鉴定植物残体,实现了植物残体统计的半定量化。

由于孢粉具有在地层中易于保存、产量大等特点,常被用来反演区域古植物的变化。在湿地生态系统中,丰富的植物、较弱的水动力以及水下还原性的沉积环境,使通过孢粉对湿地古植物演替的分析更具有可行性^[36,37]。开始时,是定性的、直观的分析孢粉与植被之间的关系,随着现代表土孢粉研究的不断深入,全球不同区域的表土孢粉组合与植物、气候等参数间的关系日渐明确,并且一些地区已经初步建立了定量的函数关系。将泥炭层化石花粉组合与周围一定范围内已知植物类型的现代花粉谱进行对比,根据孢粉组合的相似性,可以定量获取古植被状况^[38-40]。通过孢粉反演的植物演替状况,可以与植物残体鉴定的结果相互对比、验证,也可以结合其它指标如植硅体等的分析结果,以提高湿地植被演替序列重建的可靠性。

3.3.2 重建湿地历史时期水位变化

利用现代生态调查中建立的有壳变形虫与水位的转换函数,根据湿地沉积物中有壳变形虫的分布特征,可以对湿地古水位进行推演。1998年,伍德兰(Woodland W A)利用有壳变形虫,重建了英国Bolton Fell Moss湿地历史时期的水位变化^[41]。由于有壳变形虫在淡水环境中分布的广泛性,基于有壳变形虫重建古水位的研究在其它国家和地区也陆续开展^[42-44]。

此外,湿地中的植物残体也可以反演水位变化^[45,46],因为湿地剖面中植物残体发生变化的驱动因素就是降水量和温度^[35]。休斯(Hughes P D M)等在英国坎布里亚郡的沃尔顿沼泽中,对3个剖面

的植物残体进行分析,观察到明显的湿地干湿转换的一致性,并与其它气候代用指标反演的气候变化趋势相一致^[47]。利用现代生态调查所得出的植物与水位之间的关系,基于湿地沉积物中的植物残体记录,可以在一定程度上反演古水位的变化。然而,湿地垦殖、放牧、泥炭开采等人类活动对湿地的干扰,会直接或间接地影响湿地水位的变化,因此对近现代以来的湿地古水位重建较为困难,应采用多指标综合分析的办法,例如腐殖化度^[48]、碳同位素^[39,40]、有机质含量^[40,49]、磁化率^[38,40]、粒度^[50]等指标,在一定程度上都可以反映湿地水位的变化。

3.3.3 重建湿地历史时期水环境要素

湿地的水环境要素包括pH、总氮、总磷、盐度、矿化度和温度等,是表征湿地状况的重要参数。湿地中的硅藻、有壳变形虫等都能反映湿地的水环境要素。利用硅藻与pH之间的转换函数,基于湿地沉积物中的古硅藻记录,可以重建历史时期湿地水体的pH变化^[51]。研究发现,富营养沼泽中硅藻的百分含量明显多于贫营养沼泽,说明了养分状况对硅藻组成有显著作用^[52]。意大利学者马可(Marco Cantonati)等在阿尔卑斯东南部丹塔迪卡多雷沼泽中,利用具有代表性的硅藻组合类型,重建了沼泽水体的矿化度^[53]。

pH是仅次于水分而影响有壳变形虫的因素,同样可以利用有壳变形虫与pH之间的转换函数,重建历史时期的湿地pH^[54,55]。湖泊中经常用到的摇蚊、甲螨、介形类、枝角类以及金藻等化石,记录了过去生态系统的状况,可以定量反演历史时期的水环境要素^[20]。相关技术可以借鉴到湿地生态系统中,补充历史时期的湿地水环境数据。

3.4 识别历史时期人类活动信息

湿地基准环境构建的关键在于识别人类活动开始影响湿地生态系统的时期。历史时期的人类活动信息可以通过考古资料和历史文字记录等来确认。除了丰富的人文资料,在湿地沉积物中记录的一些信息,诸如黑碳^[56,57]、重金属^[58,59]和多环芳烃^[60]等,同样可以被用来评估历史时期人类活动的信息。人类活动强度的加重和人类排放污染物的增加,都会使得湿地沉积记录中相应层位中的黑碳和重金属沉积通量明显增加^[56,58]。人类世(Anthropocene)以来,生态系统中的植物物种变化迅速^[61],也可以通过对湿地沉积物中植物物种的变化,来定性判断人类活动影响开始的时间。而

对湿地沉积记录中保存的黑碳、重金属和多环芳烃等化学指标的综合研究,对研究区域丰富的考古信息记录的挖掘,可以更加准确地识别人类活动对湿地生态系统的影响程度,从而找出形成于未受人类活动影响时期的湿地沉积层位,该层位的沉积物可以作为湿地生态系统基准环境识别的测试材料。

3.5 生态系统弹性力的评估

生态系统弹性力的评估可通过测算系统处于适应性循环4个阶段(快速生长、稳定守恒、释放和重组)中的何种位置,距离系统崩溃阈值的远近,朝阈值运行的速率等来实现^[62-64]。湿地生态系统中存在着变量和影响变量变化的驱动因子,以及变量与因子之间的各种正负反馈圈^[62],这种反馈圈是系统中变量与因子相互联系的纽带。每一个关键变量都有阈值,如果跨越了阈值,系统则会以另一种方式运行,而且通常都伴有不合理及不可预见的意外发生^[11]。当人类活动对湿地生态系统的影响越来越剧烈,最终越过了这个阈值,生态系统各组分的相互作用就会被打破,生物物种、水文条件和养分状况等都会发生异常变化。这就是生

态系统适应性循环的释放阶段,系统在这种变化中杂乱无章,遭到严重的破坏,已经无法通过自身的恢复能力进行恢复。因此,可以将生物物种、水文条件和养分状况等因子发生异常变化的点作为湿地弹性力的阈值。通过测定系统开始受到人类活动影响时该因子距离阈值的远近以及系统走向阈值的速率,来评估湿地生态系统的弹性力。弹性力评估的准确性很大一部分取决于选择的因子及参比状态,因此,应该选择最能体现生态系统发展方向的因子集,来评估生态系统的弹性力^[65]。

4 湿地恢复目标的参照系统

为了方便实际湿地恢复工作的可参照性,湿地恢复目标参照系统可以按照表1中的格式制定。恢复目标侧重于湿地生态系统的生物恢复(群落结构、优势物种)和生境恢复(水文状况、养分状况),恢复后的生态特征指标与调查的环境现状生态特征指标、重建的基准环境生态特征指标保持一致。不同湿地类型的植物、水文、土壤等特征有较大差异,表1是以碟形洼地类型的湿地为例,在制定湿地恢复目标的实际操作中,应该对不同

表1 湿地恢复目标参照系统示例
Table 1 The example of reference conditions for wetland restoration

湿地类型	项目	植物特征			水文特征			土壤特征		
		群落结构	优势物种	...	生境水深	水质(pH...)	...	营养盐(N/P...)	重金属	...
碟形洼地	环境现状	...	...		...	...		...	...
	基准环境	...	...		...	...		...	...
	恢复目标	...	...		...	...		...	...
.....	

类型的湿地加以区分。

5 结 语

湿地的生态恢复是学者们十分关注的问题,目前国际上许多著名的湿地都已经开展了生态恢复工程,如美国的佛罗里达州大沼泽、湄公河三角洲湿地、欧洲瓦登海海滨湿地以及中国太湖湖滨湿地、黄河三角洲湿地、松嫩平原湿地和三江平原湿地等。在不同的社会、经济、文化背景下,湿地生态恢复的要求也不同。有的是重新获得一个既包括原有特性,又包括对人类有益的新特性状态,有的是修复到湿地原来的状态。在恢复到原来湿地状态的实践中,基准环境和弹性阈值的研究可

以提供湿地恢复的综合生态特征指标,包括优势物种、生境水深、养分状况等,并以此来制定湿地生态恢复目标,同时可以验证湿地是否恢复成功。然而基于古生态记录,依据弹性理论,制定湿地生态恢复目标的研究,还显得相对薄弱,因此这方面的工作亟需开展。

参考文献

[1]European Union. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy[J]. Official Journal of the European Communities, 2000, **L327**: 1-72
[2]吴后建, 王学雷. 中国湿地生态恢复评价研究进展[J]. 湿地科学, 2006, **4**(4): 304-310.

- [3]宋晓林, 吕宪国. 中国退化河口湿地生态恢复研究进展[J]. 湿地科学, 2009, **7**(4): 379-384.
- [4]Cairns J. The recovery process in damaged ecosystems[M]. Michigan: Ann Arbor Science Publishers, 1980.
- [5]Interagency Workgroup on Wetland Restoration. An Introduction and User's Guide to Wetland Restoration, Creation, and Enhancement[M/OL]. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington D C, 2003, <http://www.epa.gov/owow/wetlands/pdf/restdocfinal.pdf>.
- [6]Linkov I, Bridges T, Creutzig F, *et al.* Changing the resilience paradigm [J]. Nature Climate Change, 2014, **4**(6): 407-409.
- [7]Westman W E. Measuring the Inertia and Resilience of Ecosystems[J]. Bioscience, 1978, **28**(11): 705-710.
- [8]Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, **4**(1): 1-23.
- [9]Webster J R, Gurtz M E, Hains J J, *et al.* Stability of Stream Ecosystems[M]//Barnes J, Minshall G W. Stream Ecology. New York: Springer US, 1983: 355-395.
- [10]Lake P S. Resistance, resilience and restoration[J]. Ecological Management & Restoration, 2013, **14**(1): 20-24.
- [11]Walker B, Salt D. Resilience Thinking: Sustaining Ecosystem and People in a Changing World[M]. New York: Island Press, 2006.
- [12]White P S, Walker J L. Approximating nature's variation: selecting and using reference information in restoration ecology[J]. Restoration Ecology, 1997, **5**(4): 338-349.
- [13]Hughes R M, Kaufmann P R, Herlihy A T, *et al.* A process for developing and evaluating indices of fish assemblage integrity[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1998, **55**(7): 1618-1631.
- [14]Muxika I, Borja Á, Bald J. Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive[J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, **55** (1-6): 16-29.
- [15]Comín F A, Sorando R, Darwiche-Criado N, *et al.* A protocol to prioritize wetland restoration and creation for water quality improvement in agricultural watersheds[J]. Ecological Engineering, 2014, **66**(3): 10-18.
- [16]Mahan C G, Young J a, Miller B J, *et al.* Using ecological indicators and a decision support system for integrated ecological assessment at two national park units in the Mid-Atlantic Region, USA[J]. Environmental Management, 2014, **55**(2): 508-522.
- [17]Cui B, Yang Q, Yang Z, *et al.* Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China [J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(7): 1090-1103.
- [18]Leira M, Jordan P, Taylor D, *et al.* Assessing the ecological status of candidate reference lakes in Ireland using palaeolimnology [J]. Journal of Applied Ecology, 2006, **43**(4): 816-827.
- [19]Pickett S T A. Space-for-Time substitution as an alternative to long-term studies[M]//Likens G. Long-Term Studies in Ecology. New York: Springer New York, 1989: 110-135.
- [20]董旭辉, 羊向东. 湖泊生态修复基准环境的制定: 古生态学面临的机遇[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(6): 974-984.
- [21]Chambers F M, Charman D J. Holocene environmental change: contributions from the peatland archive[J]. The Holocene, 2004, **14**(1): 1-6.
- [22]Barak R S, Hipp A L, Cavender-Bares J, *et al.* Taking the long view: Integrating recorded, archeological, paleoecological, and evolutionary data into ecological restoration[J]. International Journal of Plant Sciences, 2016, **177**(1): 90-102.
- [23]Cole L E S, Bhagwat S A, Willis K J. Long-term disturbance dynamics and resilience of tropical peat swamp forests[J]. Journal of Ecology, 2015, **103**(1): 16-30.
- [24]Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being[M]. Washington D C: Island Press, 2005.
- [25]Mace G. Global change: Ecology must evolve[J]. Nature, 2013, **503**(7475): 191-192.
- [26]Lou Y, Zhao K, Wang G, *et al.* Long-term changes in marsh vegetation in Sanjiang Plain, northeast China[J]. Journal of Vegetation Science, 2015, **26**(4): 643-650.
- [27]Crockett A C, Ronayne M J, Cooper D J. Relationships between vegetation type, peat hydraulic conductivity, and water table dynamics in mountain fens[J]. Ecohydrology, 2015, doi: 10.1002/eco.1706.
- [28]陈旭, 卜兆君, 王升忠, 等. 长白山哈泥泥炭地七种苔藓植物生态位[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(3): 574-578.
- [29]Lou Y, Wang G, Lu X, *et al.* Zonation of plant cover and environmental factors in wetlands of the Sanjiang Plain, northeast China [J]. Nordic Journal of Botany, 2013, **31**(6): 748-756.
- [30]张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [31]Birks H J B. Quantitative palaeohydrological reconstructions. Statistical modelling of quaternary science data[J]. Technical Guide, 1995, **5**: 161-254.
- [32]Turekian K K. The Late Cenozoic Glacial Ages[M]. Connecticut: Yale University Press, 1971.
- [33]Van Geel B. A palaeoecological study of holocene peat bog sections in Germany and The Netherlands, based on the analysis of pollen, spores and macro- and microscopic remains of fungi, algae, cormophytes and animals[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 1978, **25**(1): 1-120.
- [34]Blundell A, Holden J. Using palaeoecology to support blanket peatland management[J]. Ecological Indicators, 2014, **49**: 110-120.
- [35]Barber K, Chambers F, Maddy D, *et al.* A sensitive high-resolution record of late Holocene climatic change from a raised bog in northern England[J]. The Holocene, 1994, **4**(2): 198-205.
- [36]Hättestrand M, Jensen C, Hallsdóttir M, *et al.* Modern pollen accumulation rates at the north-western fringe of the European boreal forest[J]. Review of Palaeobotany & Palynology, 2008, **151** (3): 90-109.
- [37]Zhao Y, Yu Z, Zhao W. Holocene vegetation and climate histories in the eastern Tibetan Plateau: controls by insolation-driven

- temperature or monsoon-derived precipitation changes?[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, **30**(9): 1173-1184.
- [38]Schmidt R, Koinig K A, Thompson R, *et al.* A multi proxy core study of the last 7000 years of climate and alpine land-use impacts on an Austrian mountain lake (Unterer Landschitzsee, Niedere Tauern)[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2002, **187**(1-2): 101-120.
- [39]Spooned I S, Mazzucchi D, Osborn G, *et al.* A multi-proxy holocene record of environmental change from the sediments of Skinny Lake, Iskut region, northern British Columbia, Canada[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2002, **28**(4): 419-431.
- [40]Onac B P, Hutchinson S M, Geanta A, *et al.* A 2500-yr late Holocene multi-proxy record of vegetation and hydrologic changes from a cave guano-clay sequence in SW Romania[J]. *Quaternary Research*, 2015, **83**(3): 437-448.
- [41]Woodland W A, Dan J C, Sims P C. Quantitative estimates of water tables and soil moisture in Holocene peatlands from testate amoebae[J]. *Holocene*, 1998, **8**(3): 261-273.
- [42]Booth R K. Testate amoebae as paleoindicators of surface-moisture changes on Michigan peatlands: modern ecology and hydrological calibration[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2002, **28**(3): 329-348.
- [43]Bobrov A A, Dan J C, Warner B G. Ecology of Testate Amoebae (Protozoa: Rhizopoda) on Peatlands in Western Russia with Special Attention to Niche Separation in Closely Related Taxa[J]. *Protist*, 1999, **150**: 125-136.
- [44]Payne R J, Mitchell E A D. Ecology of testate amoebae from mires in the Central Rhodope Mountains, Greece and development of a transfer function for palaeohydrological reconstruction [J]. *Protist*, 2007, **158**(2): 159-171.
- [45]Aarnes I, Kühl N, Birks H H. Quantitative climate reconstruction from late-glacial and early Holocene plant macrofossils in western Norway using the probability density function approach [J]. *Review of Palaeobotany & Palynology*, 2012, **170**(1): 27-39.
- [46]Wang C, Zhao H, Wang G. Vegetation development and water level changes in Shenjiadian peatland in Sanjiang Plain, Northeast China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2015, **25**(4): 451-461.
- [47]Hughes P D M, Mauquoy D, Barber K E, *et al.* Mire-development pathways and palaeoclimatic records from a full Holocene peat archive at Walton Moss, Cumbria, England[J]. *Holocene*, 2000, **10**(4): 465-479.
- [48]Blackford J, Chambers F M. Proxy climate record for the last 1000 years from Irish blanket peat and a possible link to solar variability[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, **133**(1): 145-150.
- [49]Heiri O, Lotter A F, Lemcke G. Loss on Ignition as a Method for Estimating Organic and Carbonate Content in Sediments: Reproducibility and Comparability of Results[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2001, **25**(1): 101-110.
- [50]Campbell C. Late Holocene Lake Sedimentology and Climate Change in Southern Alberta, Canada [J]. *Quaternary Research*, 1998, **49**(1): 96-101.
- [51]Birks H J B, Line J M, Juggins S. Diatoms and pH reconstruction [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1990, **327**(1240): 263-278.
- [52]Kingston J C. Association and distribution of common diatoms in surface samples from northern Minnesota peatlands[M]//Håkansson H, Gerloff J. *Diatomaceae III*. Vaduz: Nova Hedwigia Beihefte, 1982: 333-346.
- [53]Cantonati M, Lange-Bertalot H, Decet F, *et al.* Diatoms in very-shallow pools of the site of community importance Danta di Cadore Mires (south-eastern Alps), and the potential contribution of these habitats to diatom biodiversity conservation[J]. *Nova Hedwigia*, 2011, **93**(3): 475-507.
- [54]Booth R K, Sullivan M E, Sousa V A. Ecology of testate amoebae in a North Carolina pocosin and their potential use as environmental and paleoenvironmental indicators[J]. *Ecoscience*, 2008, **15**(2): 277-289.
- [55]Lamentowicz M, Mitchell E A D. Testate amoebae as ecological and palaeohydrological indicators in peatlands—The Polish experience[M]//Okrusko T, Maltby E, Szatylowicz J, *et al.* *Wetlands: Monitoring, Modelling, Management*. New York: Taylor & Francis, 2007: 85-90.
- [56]Gao C, Lin Q, Zhang S, *et al.* Historical trends of atmospheric black carbon on Sanjiang Plain as reconstructed from a 150-year peat record[J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 5723-5723.
- [57]Tan Z, Han Y, Cao J, *et al.* Holocene wildfire history and human activity from high-resolution charcoal and elemental black carbon records in the Guanzhong Basin of the Loess Plateau, China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, **109**: 76-87.
- [58]Gao C, Bao K, Lin Q, *et al.* Characterizing trace and major elemental distribution in late Holocene in Sanjiang Plain, Northeast China: Paleoenvironmental implications[J]. *Quaternary International*, 2014, **349**(1): 376-383.
- [59]Thevenon F, Guédron S, Chiaradia M, *et al.* (Pre-) historic changes in natural and anthropogenic heavy metals deposition inferred from two contrasting Swiss Alpine lakes[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, **30**(1): 224-233.
- [60]Elmqvist M, Zdenek Z, Orjan G. A 700 year sediment record of black carbon and polycyclic aromatic hydrocarbons near the EMEP air monitoring station in Aspöreten, Sweden[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(20): 6926-6932.
- [61]Thomas C D. Rapid acceleration of plant speciation during the Anthropocene[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, **30**(8): 448-455.
- [62]Bennett E M, Cumming G S, Peterson G D. A systems model approach to determining resilience surrogates for case Studies[J]. *Ecosystems*, 2005, **8**(8): 945-957.
- [63]Carpenter S R, Westley F, Turner M G. Surrogates for resilience of Social-Ecological Systems[J]. *Ecosystems*, 2005, **8**(8): 941-944.
- [64]Gumming G S, Barnes G, Perz S, *et al.* An exploratory framework for the empirical measurement of resilience: Surrogates for resilience of social-ecological systems[J]. *Ecosystems*, 2005, **8**(8): 975-987.

[65]Müller F, Bergmann M, Dannowski R, *et al.* Assessing resilience in long-term ecological data sets[J]. *Ecological Indicators*, 2015,

65: 10-43.

The Prospects in Studying Reference Conditions Constructing of Ecological Restoration of Wetlands based on Paleoecological Records

LIU Hanxiang^{1,2}, GAO Chuanyu¹, YU Xiaofei¹, ZHANG Zhenqing¹, WANG Guoping¹

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin, P.R.China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

Abstract: The conservation and restoration of wetlands have great significance for building the ecological civilization in China and constructing reference conditions of ecological restoration of wetlands is a key to achieve this goal. However, the limitations of some main methods (e.g. history, refer-site) of constructing reference conditions have been existed during the past decades, and the applications of wetland conservation and restoration are not popular as other ecosystems. More researches need to be focused on both theory and application to construct the reference conditions for wetland restoration. In this paper, the concept of baselines and resilience theory were introduced, as well as the main methods of constructing reference conditions were reviewed. And then, we focus on how to construct reference conditions of wetland restoration by paleoecological methods. That is, the relationships between biological indicators and environmental factors were established by modern ecological surveys; and history conditions of wetland ecological characters (e.g. vegetation, hydrology and nutrient status) are reconstructed by using paleoecological indicators (e.g. plant macrofossils, pollen, testate amoebae and diatoms), the evolutions of wetland ecosystems were explored through statistical analysis of long term paleoecological characteristic records in the wetland sedimentary cores. The degree of human activities in different historical periods of wetland ecosystem could be revealed by sedimentary records (e.g. heavy metal, black carbon, polycyclic aromatic hydrocarbons) and archaeological data, and severe impact period were identified through abnormal changes of paleoecological characteristic records. Combine with the above study results, the ecological characteristics of the wetlands before anthropogenic influence could be established, and could be regard as baselines for regional wetland ecosystem. Consider the ecosystem resilience theory (i.e. self-recovery capability of wetland ecosystem); the reference conditions for wetland restoration were formulated by baselines conditions of the wetlands. This study provided a theoretical basis for ecological restoration of wetlands.

Keywords: reference conditions for wetland ecological restoration; paleoecological records; baselines; system resilience