DOI: 10.5846/stxb201809071921

齐清,刘晓伟,佟守正,张冬杰,王雪宏,薛振山,安雨.苔草草丘恢复湿地景观变化研究——以哈尔滨太阳岛为例.生态学报,2019,39(14): -... Qi Q, Liu X W, Tong S Z, Zhang D J, Wang X H, Xue Z S, An Y.Analysis of landscape pattern changes of restored tussock wetland in Sun Island, Harbin, China.Acta Ecologica Sinica,2019,39(14): -...

苔草草丘恢复湿地景观变化研究

——以哈尔滨太阳岛为例

齐 清^{1,2},刘晓伟³,佟守正^{1,*},张冬杰¹,王雪宏¹,薛振山¹,安 雨¹ 1中国科学院东北地理与农业生态研究所,长春 130000 2中国科学院大学,北京 100000 3东北师范大学地理科学学院,长春 130000

摘要:湿地景观变化是湿地生态学领域研究的重要内容。湿地景观要素在不同时间和空间的变化过程研究是揭示湿地演变规 律,开展生态恢复实践的重要科学基础。本文以哈尔滨太阳岛苔草草丘恢复湿地为例,采用野外调查与 3S 技术相结合的方法, 选取草丘面积、斑块形状特征、草丘数量及形态特征等指标,探究草丘湿地恢复过程中的景观变化,为开展湿地恢复提供了重要 的科学依据。结果表明:经过 8 年的恢复,苔草草丘景观变化明显。草丘数量增多,丘墩高度、直径、植株高度、冠幅显著增加 (*P*<0.05);湿地恢复后,苔草群落向外扩展 722 m²,苔草草丘总面积达 2222 m²,扩展率为 48.13%;在湿地微地貌和水文条件等 因素的综合作用下,草丘群落扩展方向具有一定规律性,斑块边界和质心分别向西南方向扩展了 29.91 m 和迁移了 5.9 m,扩展 度和曲线边界比重不断增加,斑块形状和边界趋于复杂,景观空间异质性增强;利用根茎克隆繁殖结合水位调控可实现苔草草 丘的快速恢复。

关键词:苔草草丘;景观变化;恢复过程;湿地;太阳岛

Analysis of landscape pattern changes of restored tussock wetland in Sun Island, Harbin, China

Qi Qing^{1,2}, Liu Xiaowei³, Tong Shouzheng^{1,*}, Zhang Dongjie¹, Wang Xuehong¹, Xue Zhenshan¹, An Yu¹

1 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China

3 Northeast Normal University, Changchun 130000, China

Abstract: Changes of wetland landscape is an essential component of wetland ecology. Study of the temporal and spatial changes of landscape elements provides the scientific foundation for revealing the rule of wetland evolution and carrying out ecological restoration practices. We selected the restored *Carex appendiculata* tussock wetland in Sun Island as the study area and used 3S technology and filed survey to clarify the characteristics of the spatial and temporal variations in landscape patterns during restoration succession. The area of tussock wetland, expansion rate, shape, number, and morphological characteristics of tussock wetland that the landscape pattern changed significantly after 8-year restoration: 1) The number, height and diameter of tussocks, as well as the plant height and crown width greatly increased (P < 0.05). 2) The area of tussock wetland was increased by about 722 m² with an expansion rate of 48.13%, and the total area of restored tussock

基金项目:国家自然科学基金项目(41871101);吉林省科技发展计划项目(20190201115JC)

收稿日期:2018-09-07; 修订日期:2019-04-02

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: tongshouzheng@iga.ac.cn

wetland reached 2222 m². 3) The combined effect of microtopography and hydrology led to regular expansion in the *Carex* tussock community. The patch boundary and centroid expanded 29.91 m and migrated 5.9 m to the low-lying southwest, respectively. Additionally, the increasing development (D) and weight of curve boundary (W) indicated that the shape and boundary of a patch tended to be complex, and thus enhancing landscape heterogeneity. 4) Rapid recovery of *Carex* tussock can be achieved by rhizome reproduction accompanied with water-level regulation.

Key Words: Carex tussock; landscape change; restoration process; wetland; Sun Island

景观格局是湿地生态学研究的重要内容之一,它是指大小和形状不一的景观斑块在空间上的排列,是景观异质性的重要表现,也是各种生态过程在不同尺度上作用的结果^[1]。湿地景观格局的是湿地结构和功能变化评估的重要依据,对认识湿地生态过程和功能具有重要意义^[2-4]。苔草草丘是沼泽湿地的标志性景观^[5-6],具有涵养水源、净化水质、调节径流、生物固碳、提供栖息地和维持生物多样性等多种生态功能^[7-8]。草丘在向地表凸起生长过程中,增加了湿地的表面积,为湿地生物提供了更多的生存空间^[9-10],独特的丘墩形态增加了微地形的异质性,使光照和水分在草丘顶部、基部以及草丘间隙存在显著差异,形成了多样的微生境,为生物多样性维持提供了有利条件^[11-14]。同时,草丘发达的根系所形成的海绵状结构也为湿地水源涵养和水质净化创造了特殊的净化场地^[15-16]。

受过度放牧、挖沟排水、挖掘泥炭等不合理的人类活动及长期水位剧烈变化等因素的影响,近年来苔草草 丘湿地出现了不同程度的退化、甚至大面积消亡等现象^[17-20]。苔草草丘曾是黑龙江哈尔滨太阳岛的一大特 色景观,春季芳草绒绒,夏季郁郁葱葱,秋季五彩斑斓,冬季白雪覆顶,极具观赏价值,是该区生态旅游首选观 赏区域之一。本世纪初受多种人类活动等因素影响,该区苔草草丘发生了严重退化和大面积死亡的现象。为 了保护和修复苔草草丘景观,中科院东北地理与农业生态研究所湿地恢复研究团队于 2008 年春季,在太阳岛 景区开展了小面积的草丘恢复实验,成功研发了苔草草丘原位分根(分株)取苗和干湿交替的根茎克隆恢复 技术,并于 2009 年和 2010 年春季在该区域进行扩繁,成功恢复苔草草丘 1500 m²。本文在前期工作基础上, 以哈尔滨太阳岛草丘恢复湿地为研究对象,分析了小微尺度苔草草丘景观空间格局的动态变化,明确了草丘 湿地景观的恢复过程,为揭示草丘湿地的变化规律提供了科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国东北平原松花江北岸哈尔滨市太阳岛风景区(图1)。该区属温带湿润、半湿润大陆性季风气候,年平均气温 5.24℃,最高温 38℃,最低温-37℃,生长期 140—160 天。年平均降水量 569.1 mm,主要集中在 6—9月。该区主要土壤类型为草甸土^[21],地势低平,微地貌广泛发育,水分来源主要依靠松花江洪泛时的地表侧渗补给,水位波动频繁,变化幅度不大,一般不超过 1 m。研究区总面积 3800 m²,以灰脉苔草(Carex appendiculata),芦苇(Phragmites australis),香蒲(Typha orientalis)等湿地植物为主,伴生种主要有小叶章(Deyeuxia angustifolia),桃叶蓼(Polygonum persicaria),泽芹(Sium suave)等。

1.2 景观变化分析方法

鉴于影像的质量和可获取性,选取 2010 年 Google Earth 影像和 2015 年 6 月 13 日的 Worldview-2 遥感影像(分辨率 0.5 m),结合 2017 年和 2018 年野外实地调查、坐标记录及前期(2008—2010 年)数据记载,对研究 区的形状、颜色和植被空间分布进行分析,建立景观判读标准,利用 Arcgis10.2 进行影像解译,确定 2010 年、2015 年、2018 年苔草草丘的恢复范围,之后利用 Arcgis 测量并计算上述时间苔草草丘的面积(*S*)、面积增长 速率(*Vs*)、边界长度(*L*)、边界拓展速率(*V_B*)、质心坐标、扩展度(*D*),具体计算公式如下^[22-23]:

利用公式(1,2)计算面积增长速率(Vs)和边界扩展速率(V_B):



图 1 哈尔滨太阳岛风景区地理位置 Fig.1 Location of Sun Island in Heilongjiang Province

$$V_{s} = \frac{S_{m} - S_{n}}{m - n + 1}$$
(1)

$$V_B = \frac{B_m - B_n}{m - n + 1} \tag{2}$$

其中, V_s 表示面积的增长速率, S_m 和 S_n 分别为恢复第 m 年和第 n 年草丘面积; V_B 表示边界扩展速率, B_m 和 B_n 分别为恢复第 m 年和第 n 年草丘边界距离。

利用斑块扩展度(D)表示斑块形状,公式(3):

$$D = \frac{P}{2\sqrt{\Pi A}} \tag{3}$$

其中,P为斑块边界长度,A为斑块面积,斑块周长与等面积圆周长之比,反映斑块形状与圆形相似度,其 值接近1说明斑块越近似圆形,其值越大,说明斑块面积有效性越小,边缘地带越大,形状越复杂。

利用曲线边界比重(W)来表示斑块边界特征,公式(4):

$$W = \frac{L_{sb}}{L_{tb}} \tag{4}$$

斑块曲线边界的长度(L_{sb})与总边界长度(L_{bb})之比,反映斑块边界的复杂化程度,曲线边界比重越大说明斑块边界越复杂,异质性越高。

另外,本研究还测量了 2010 年和 2018 年生长季草丘高度、直径、植株高度、冠幅,用于对比分析恢复初期 和恢复 8 年后草丘景观的变化。

1.3 数据分析

数据采用 Excel 2010 及 SPSS 23 对数据进行统计分析,采用 Arcgis 10.2 和 Origin 9.0 作图。

2 结果

2.1 草丘数量及形态特征

实地调查发现,截至 2018 年,苔草草丘数量较 2010 年扩繁初期明显增多,苔草草丘增加了 230 墩,增幅达 10%。草丘地上部分的丘墩高度,直径,植株高度,冠幅均有显著增长(P<0.05,表1,图2)。丘墩高度增加 了 12.18±3.88 cm,丘墩直径增加了 16.38±3.69 cm,植株高度增加了 3.53±1.47 cm,冠幅增加了 21.53±7.40 cm。草丘景观恢复前后具有显著差异。

表 1 2010 年与 2018 年草丘形态特征均值的单样本 t 检验分析结果

Table 1 One-sample t-test analysis results of tussock characteristics in 2010 and 2018

	T 值 T	自由度 Df	显著性 Sig.		T 值 T	自由度 Df	显著性 Sig.
墩高 Hummock height	24.339	59	0.000	株高 Plant height	2.194	59	0.032
直径 Diameter	34.374	59	0.000	冠幅 Crown width	9.587	59	0.000

2.2 草丘面积变化

调查结果显示:到 2015 年恢复区草丘总面积为 1858 m²,较 2010 年增加了 358 m²,增幅达 23.87%。截 至 2018 年,草丘总面积为 2222 m²,较恢复初期增加 48. 13%。这说明经过 8 年的自然恢复,苔草草丘面积增加 明显,总拓展面积达 722 m²,平均拓展速率为 90.25 m²/a。

自然恢复的草丘面积所占比例逐渐增加。2010年 恢复区苔草草丘均为人工恢复,人工恢复面积所占比例 为100%,无自然恢复草丘。2015年,由于草丘自然向 外恢复扩展,人工恢复草丘面积比例下降为76.13%,自 然恢复的草丘面积比例增长至23.87%,此时,恢复区苔 草草丘仍以人工恢复为主。2018年,人工恢复区面积 比例继续下降为51.83%,自然恢复区面积比例增加至 48.13%,此时,人工和自然恢复条件下草丘面积基本一 致,未来研究区内自然条件生长的草丘进一步发展,将 促使整个恢复区更接近天然草丘湿地。

2.3 斑块形状变化特征

为探讨太阳岛苔草草丘恢复后的景观格局变化,选 择斑块形状作为景观格局变化的表征指标。如图 4, 2010年,2015年及 2018年草丘湿地的扩展度分别为 1. 17,1.42,1.41,曲线边界比重分别为 0.44,0.75,0.89,说 明恢复时间增长,草丘湿地的扩展度及曲线边界比重都 呈明显的增加趋势。

扩展度反映斑块的形状特征,扩展度越大说明斑块 边缘地带越大,形状越复杂。相较于形状规则、边界笔 直的人工恢复区,通过自然恢复形成的扩展区呈边界复 杂的不规则多边形。自然扩展斑块面积的增大导致塔 头湿地的斑块形状逐渐不规则化。随着恢复时间的增 长,斑块边缘地带增多,曲线边界长度逐渐增加,边界异 质性增强。斑块形状的复杂化及边缘地带微地貌和水 分条件的不同,是导致草丘景观空间异质性增强的重要 因素。



图 2 人工恢复区恢复前后苔草草丘墩高、直径、株高、冠幅差异 Fig.2 Differences in height, diameter, plant height and crown width of *Carex* tussock of artificial restoration area between 2010 and 2018





恢复过程中,苔草草丘向地势较低的西南侧和东侧扩展。如图 3,2010 年至 2015 年,苔草草丘向西南方

向扩展 24.8 m,向东侧扩展 9.0 m,平均扩展速率分别为 4.96 m²/a 和 1.8 m²/a,2015 年至 2018 年,苔草草丘继 续向西南方向扩展了 5.1 m,向东侧扩展了 4.27 m,平均 扩展速率分别为 1.70 m²/a 和 1.42 m²/a。此外,通过对 比两个方向面积扩展速率和边界扩展速率发现:随着恢 复时间的增加,草丘面积扩展速率逐渐加快,边界扩展

斑块形状变化和扩展导致斑块质心迁移。2010年至 2018年,苔草草丘湿地的分布质心向西南方向平稳 迁移(图3),2010年至 2015年,质心迁移 3.0 m,平均迁移速率 0.6 m/a,2015年至 2018年,质心迁移 2.9 m,平均迁移速度 0.97 m/a,质心迁移速率加快。



图 4 不同恢复年限斑块扩展度和曲线边界比重 Fig. 4 Patch development and weight of curve boundary in different recovery period

3 讨论

水文格局控制着湿地植被结构、演替过程,同时与植被、微地貌存在反馈作用^[24],草丘的形成发育及空间 分布与水文格局密切相关。水位较低且波动较频繁利于形成高大紧实的草丘,水位过深导致草丘结构松散, 甚至死亡^[25]。自然条件下苔草草丘群落在一定程度上依水文地貌呈有规律的分布^[26-27],呈现不同的分布格 局^[28-29]。研究区自然地势相对平坦,植被仅在某一方向有规律显著扩展,很可能是苔草种子随水文波动漂浮 停留繁殖的结果。

Table	2 Area expansion rate (Vs) a	and boundary expansion rat	te (V_B) in different recovery p	period	
年份	面积扩	展速率	边界扩展速率		
	Area expansion 1	rate $V_S/(m^2/a)$	Boundary expansion rate $V_B/(m/a)$		
Year/a	西南侧	东侧	西南侧	东侧	
2010—2015	57.24	14.36	4.96	1.80	
2015—2018	76.33	37.67	1.70	1.42	

表 2 不同恢复年限面积扩展速率 Vs 与边界扩展速率 V_B

种间竞争影响植物群落构建及其空间分布格局^[31-32],在辽河口盐沼湿地,芦苇群落和碱蓬群落的竞争, 直接抑制了碱蓬群落的扩张,导致碱蓬群落斑块定植面积减少^[33];在黄河口滨海盐沼,种间竞争不仅调控柽 柳的带状分布格局,同时限制盐地碱蓬的空间分布^[34];崇明东滩盐沼湿地莎草科群落格局形成机制的研究也 表明,种间竞争是影响其分布格局的重要因素^[35]。本研究中,苔草群落外围为典型的芦苇群落和香蒲群落 (图 3 空白区域),其盖度在 7、8 月份可达 85%,其对空间资源的占据也可能是限制苔草群落向此处扩张的主 要因素。

通过对比恢复过程中草丘面积扩展速率和边界扩展速率发现:面积扩展先慢后快,边界扩展先快后慢,说 明草丘群落在向外迁移的过程中,可能采取"先深入后扩张"的扩展策略。先锋物种首先选择适宜的环境迅 速着生,在西南侧扩展区,先锋群落呈"楔形"向外扩张,迅速深入研究区非苔草群落中,当群落逐渐稳定后开 始向四周扩展,最初狭长的"楔形"斑块逐渐形成近似椭圆形斑块,沿某一方向的纵向延伸变缓,四周方向的 横向扩张加快,从而出现边界最初延伸较快后期逐渐变缓,而面积最初增长缓慢而后期逐渐加快的现象,反映 了群落演替过程中先锋物种率先定居,占据一定空间资源,通过种内和种间竞争,实现种群扩张和空间资源的 重新分配,最终达到群落的相对稳定状态。

在苔草草丘湿地的恢复过程中,国外学者分别选择播种、幼苗移栽和根茎移栽开展恢复工作。Budelsk^[36] 认为利用幼苗移栽恢复苔草草丘的方式优于种子恢复和根茎移栽恢复。通过调节水位,以幼苗移栽(*Carex*

速率逐渐减缓(表 2)。

5

stricta)的方式可促进苔草草丘的快速形成^[37],在持续 浅水位的条件下,幼苗移栽 2 年开始形成苔草草丘,恢 复 10 年可形成高 20cm 的草丘^[26]。而 van der Valk 等^[38]及 Yetka 和 Galatowitsch^[39]利用苔草(*Carex* stricta)种子及根茎却未能成功恢复苔草草丘湿地。本 研究利用根茎(*Carex appendiculata*)克隆繁殖(塔头分 株移栽)结合水位调控的方法^[40],在大面积恢复工作开 展 8 年后观测到恢复区外围有明显扩展的新生苔草草 丘群落,扩展率为原有面积的 48.13%,丘墩直径平均为 26.38 cm,丘墩高度平均为 22.18 cm,说明根茎移栽在 草丘湿地恢复过程中起到了重要作用。







早期研究认为,草丘个体形成比较缓慢^[41],发育建

群则更需要一个漫长的过程^[12],高度 40—60 cm 的丘墩则至少需要 60 年至上百年才能形成^[42]。 Lawrence^[26]和本研究则说明苔草草丘的形成时间在特定的恢复条件下可能比预期短。此外,结合本研究数 据与国外学者的研究结果^[7,25-26,41-42],发现(图 5)随着草丘年龄增长,丘墩生长速率逐渐减缓,表明草丘可能 采用异速生长策略,幼年期通过快速生长建群占据环境资源,到成年期生长速率减缓并趋于稳定。

4 结论

(1) 苔草草丘湿地恢复过程中景观格局变化明显。草丘数量增多,丘墩高度、直径、植株高度、冠幅较移 栽初期显著增长;苔草草丘面积增加722 m²,主要集中在地势低洼区域,总面积达2222 m²,自然恢复区所占 比例不断提高。

(2)景观空间异质性增强,扩展度和曲线边界比重不断增加,斑块形状和边界趋于复杂,空间质心向西南 方向平稳迁移 5.9 m,斑块边界分别向西南方向和向东扩展 29.9 m 和 13.27 m。

(3)草丘向外扩展时,先锋群落首先呈"楔形"向外纵深扩展,稳定后逐渐向四周横向扩张,利于苔草草丘 群落占领空间资源及维持群落稳定。

(4)利用根茎克隆繁殖结合水位调控可快速恢复苔草草丘,随着草丘年龄的增长,丘墩增长速率逐渐减缓。

致谢:特别感谢哈尔滨市太阳岛风景区管理局各位领导及工作人员对本研究的大力支持。

参考文献(References):

- [1] 傅伯杰,徐延达,吕一河.景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法.地球科学进展,2010,25(7):673-681.
- [2] 胡巍巍, 王根绪, 邓伟. 景观格局与生态过程相互关系研究进展. 地理科学进展, 2008, 27(1): 18-24.
- [3] 徐晓龙,王新军,朱新萍,贾宏涛,韩东亮. 1996—2015年巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地景观格局演变分析. 自然资源学报, 2018, 33 (11):1897-1911.
- [4] 卢晓宁,黄玥,洪佳,曾德裕,杨柳青.基于 Landsat 的黄河三角洲湿地景观时空格局演变.中国环境科学, 2018, 38(11): 4314-4324.
- [5] 赵魁义. 中国沼泽志. 北京: 科学出版社, 1999: 55-106.
- [6] 吕宪国. 中国湿地与湿地研究. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2008: 43-51.
- [7] Lawrence B A, Zedler J B. Carbon storage by Carex stricta tussocks: a restorable ecosystem service? Wetlands, 2013, 33(3): 483-493.
- [8] Koelbener A, Ström L, Edwards P J, Venterink H O. Plant species from mesotrophic wetlands cause relatively high methane emissions from peat soil. Plant and Soil, 2010, 326(1/2): 147-158.
- [9] Werner K J, Zedler J B. How sedge meadow soils, microtopography, and vegetation respond to sedimentation. Wetlands, 2002, 22(3): 451-466.
- [10] Johnston C A, Zedler J B. Identifying preferential associates to initiate restoration plantings. Restoration Ecology, 2012, 20(6): 764-772.
- [11] Crain C M, Bertness M D. Community impacts of a tussock sedge: is ecosystem engineering important in benign habitats? Ecology, 2005, 86(10): 2695-2704.

http://www.ecologica.cn

- [12] Peach M, Zedler J B. How tussocks structure sedge meadow vegetation. Wetlands, 2006, 26(2): 322-335.
- [13] 王铭,曹议文,王升忠,李鸿凯,董彦民,徐志伟,徐娜,王国栋.水位和草丘微地貌对巴音布鲁克高寒沼泽植物群落物种多样性的影响.湿地科学,2016,14(5):635-640.
- [14] Wang M, Wang G D, Wang S Z, Jiang M. Structure and richness of *Carex meyeriana* tussocks in peatlands of northeastern China. Wetlands, 2018, 38(1): 15-23.
- [15] Pan X L, Zhang D Y, Quan L. Interactive factors leading to dying-off *Carex tato* in Momoge wetland polluted by crude oil, Western Jilin, China. Chemosphere, 2006, 65(10): 1772-1777.
- [16] Wang X Y, Feng J, Zhao J M. Effects of crude oil residuals on soil chemical properties in oil sites, Momoge Wetland, China. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 161(1/4): 271-280.
- [17] Warren M, Frolking S, Dai Z H, Kurnianto S. Impacts of land use, restoration, and climate change on tropical peat carbon stocks in the twentyfirst century: implications for climate mitigation. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2017, 22(7): 1041-1061.
- [18] 傅伯杰,陈利项,马克明,王仲麟.景观生态学原理及应用.北京:科学出版社,2001.
- [19] 张冬杰,齐清,佟守正,张仲胜,王雪宏,安雨,潘艳文.干湿交替对臌囊苔草草丘生理生态的影响.生态学杂志,2018,37(1):43-49.
- [20] Cochrane T S, Elliot K, Lipke C S. Prairie Plants of the University of Wisconsin--Madison Arboretum. Madison, WI: University of Wisconsin Press, 2006.
- [21] 张俊玲. 太阳岛风景区植物景观研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
- [22] Forman R T T, Godron M. Landscape Ecology. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- [23] 肖笃宁. 景观生态学理论、方法及应用. 北京: 中国林业出版社, 1991.
- [24] Yuan J, Cohen M J, Kaplan D A, Acharya S, Larsen L G, Nungesser M K. Linking metrics of landscape pattern to hydrological process in a lotic wetland. Landscape Ecology, 2015, 30(10): 1893-1912.
- [25] Van Hulzen J B, Van Soelen J, Bouma T J. Morphological variation and habitat modification are strongly correlated for the autogenic ecosystem engineer Spartina anglica (common cordgrass). Estuaries and Coasts, 2007, 30(1): 3-11.
- [26] Lawrence B A, Zedler J B. Formation of tussocks by sedges: effects of hydroperiod and nutrients. Ecological Applications, 2011, 21(5): 1745-1759.
- [27] Rietkerk M, Van De Koppel J. Regular pattern formation in real ecosystems. Trends in Ecology & Evolution, 2008, 23(3): 169-175.
- [28] 葛俊, 邢福. 克隆植物对种间竞争的适应策略. 植物生态学报, 2012, 36(6): 587-596.
- [29] 秦先燕,谢永宏,陈心胜.湿地植物间竞争和促进互作的研究进展.生态学杂志,2010,29(1):117-123.
- [30] Vivian-Smith G. Microtopographic heterogeneity and floristic diversity in experimental wetland communities. Journal of Ecology, 1997, 85(1): 71-82.
- [31] 王兴. 荒漠草原局域短花针茅群落构建机制[D]. 银川: 宁夏大学, 2018.
- [32] Götzenberger L, De Bello F, Bråthen K A, Davison J, Dubuis A, Guisan A, Lepš J, Lindborg R, Moora M, Pärtel M, Pellissier L, Pottier J, Vittoz P, Zobel K, Zobel M. Ecological assembly rules in plant communities—approaches, patterns and prospects. Biological Reviews, 2012, 87 (1): 111-127.
- [33] 解成杰,刘泽正,谢湉,蔡燕子,李晋,崔保山. 辽河口盐沼湿地拦门沙植物群落演替特征及其驱动力分析. 北京师范大学学报:自然科 学版, 2018, 54(1): 137-143.
- [34] 贺强. 黄河口盐沼植物群落的上行、种间和下行控制因子[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [35] 项世亮. 崇明东滩莎草科植物群落格局及其形成机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [36] Budelsky R A, Galatowitsch S M. Establishment of *Carex stricta* Lam. seedlings in experimental wetlands with implications for restoration. Plant Ecology, 2004, 175(1): 91-105.
- [37] Doherty J M, Zedler J B. Increasing substrate heterogeneity as a bet-hedging strategy for restoring welland vegetation. Restoration Ecology, 2015, 23 (1): 15-25.
- [38] Van Der Valk A G, Bremholm T L, Gordon E. The restoration of sedge meadows: seed viability, seed germination requirements, and seedling growth of *Carex* species. Wetlands, 1999, 19(4): 756-764.
- [39] Yetka L A, Galatowitsch S M. Factors affecting revegetation of Carex lacustris and Carex stricta from rhizomes. Restoration Ecology, 1999, 7(2): 162-171.
- [40] 佟守正,吕宪国,姜明,周元春,武洪亮,赵威,王松玲. 塔头苔草的移栽方法:中国, CN102084747A. 2011-06-08.
- [41] Mark A F, Fetcher N, Shaver G R, Chapin III F S. Estimated ages of mature tussocks of Eriophorum vaginatum along a latitudinal gradient in central Alaska, U.S.A. Arctic and Alpine Research, 1985, 17(1): 1-5.
- [42] Costello D F. Tussock meadows in southeastern Wisconsin. Botanical Gazette, 1936, 97(3): 610-648.