

青藏高原东部尕斯库勒湖湿地种子库沿水位梯度的分布格局

刘帆^{①②}, 刘晖^③, 徐凌翔^{①②}, 程玉^{①②}, 李伟^{①②*}

① 中国科学院水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430074;

② 中国科学院武汉植物园湿地演化与生态恢复湖北省重点实验室, 武汉 430074;

③ 水利部中国科学院水工程生态研究所, 武汉 430079

* 联系人, E-mail: liwei@wbcas.cn

2012-10-17 收稿, 2013-02-06 接受

国家科技支撑计划(2012BAC06B04)和科技基础性工作专项重点项目(2007FY110100)资助

摘要 近年来, 青藏高原湿地生物多样性逐渐降低、植被严重退化. 种子库研究是开展受损湿地植物群落恢复的重要手段之一, 而种子库的空间分布格局对研究地表植被的分布格局具有指导作用. 本研究选取青藏高原东部尕斯库勒湖湿地作为研究地点, 沿水位梯度设置沉水区以及交错区 2 个区域, 在沉水区设置 3 条样线, 交错区设置 2 条样线, 探讨不同水位梯度下种子库空间分布格局, 以为青藏高原东部退化湿地种子库湿地植被修复的取样策略提供依据. 基本特征结果表明, 不同样线间、不同区域间平均种子密度($P>0.05$)以及相对丰富度($P>0.05$)差异不显著, 物种数在不同区域差异较明显($P=0.005$); Shannon (H), Simpson (D)比较结果表明, 交错区的物种多样性高于沉水区; 物种相似性 Sørensen's 比较结果仅在样线上存在差异, 第一条样线的物种相似性比其他样线差异小; 以样方为单位基于 TWINSpan 聚类进行的 DCA 分析的结果将沉水区和交错区区分开来. 疏化曲线结果表明: 为获得调查所观测到的最大物种数, 沉水区为 361 个个体, 交错区为 304 个个体; 沉水区疏化曲线个体与样方之间的垂直距离大于旱生区域, 并随着取样个体的增加而逐渐增大. 一年生或两年生物种的物种数以及高原所特有的物种数比较结果表明, 交错区物种数高于沉水区. 以上结果说明, 以尕斯库勒湖为代表的高海拔湿地种子库沿水位梯度存在带状分布格局, 这一格局的存在使得地表植被存在沿水位梯度带状分布特征的潜力.

关键词

尕斯库勒湖
青藏高原
种子库
湿地
空间分布格局

湿地是单位面积服务价值最高的生境类型之一. 在全球范围内, 湿地虽然只覆盖地球 1.5% 的面积, 却提供了全球 40% 的可更新的生态系统服务功能^[1-3], 被誉为“地球之肾”. 保护湿地及其生物多样性是当前国际社会备受关注的热点^[4-6]. 湿地的研究主要集中在湿地碳源和碳汇等功能的讨论^[7], 湿地生态系统结构^[8]以及湿地生态修复^[3]等方面. 在湿地生态修复过程中, 利用种子库修复受损湿地是目前研究的热点之一. 湿地种子库作为植物群落的潜在种群, 对提高湿地植物多样性、恢复受损湿地等起着重要作

用^[5,9-13].

青藏高原高海拔区域是我国湿地生物多样性最为丰富的地区之一. 近些年来, 湿地生物多样性逐渐降低、植被严重退化^[4,14-16]. 开展青藏高原受损湿地生物多样性恢复研究是目前研究的重点. 利用种子库修复青藏高原受损湿地生物多样性是其中重要的手段之一, 湿地种子库的空间分布格局是湿地种子库研究的重要组成部分, 也是了解植物群落构成及多样性的重点, 目前种子库空间分布格局主要针对不同类型种子库中物种分布状况, 及其对地表植被

引用格式: 刘帆, 刘晖, 徐凌翔, 等. 青藏高原东部尕斯库勒湖湿地种子库沿水位梯度的分布格局. 科学通报, 2013, 58: 1332-1339

Liu F, Liu H, Xu L X, et al. Heterogeneity in the seed bank along the water gradient of the Gahai Lake wetland on the eastern Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2013, 58: 1332-1339, doi: 10.1360/972012-1510

空间分布格局的影响加以研究^[17]。对受损的湿地而言,作为潜在的植物种群,种子库中物种的聚集分布格局使得地表植被形成或演替为斑块化的植物群落结构;种子库沿水位梯度的水平分布格局可能形成或演替为带状分布格局的地表植被;而种子库的均一分布格局则可能形成或演替为单一的群落结构^[17-19]。

产生湿地种子库空间分布不同格局的原因可能与环境相关,对于大部分湿地而言,水位的周期性变化会导致种子积累于交错区多于沉水区,使得湿地种子库形成沿水位梯度的带状分布格局^[20-22]。也有研究表明,水流扩散的抵消作用以及生境的片段化可能形成均一或者聚集分布格局^[23]。尽管目前对湿地种子库空间分布格局开展了研究,但是其选择的区域主要集中在低海拔湿地;很少选择青藏高原高海拔湿地作为研究地点,高海拔湿地种子库的空间分布格局依然不清楚,这也将直接影响对青藏高原湿地地表植被分布格局潜力的判断。

与低海拔湿地相比,青藏高原区域长期的低温和高海拔环境是湿地种子库面临的主要影响因素之一^[24]。由于长期受低温以及高海拔等因素的影响,青藏高原湿地植物在其生活史上,可以通过增加有性繁殖的方式产生更多的种子以形成更多适应环境的基因型个体^[25];物种在种类上,由于需要在较短周期内完成生活史而主要以一年生为主,也存在一定的耐高寒的青藏高原特有物种;同时该区域湿地种子库也受到与低海拔地区相似的水流和水位等因素的影响,使得种子库空间分布格局更为复杂,并将影响地表植被群落结构分布规律。

本研究选取青藏高原东部尕斯库勒湖湿地作为研究地点,旨在探讨不同水位梯度下种子库的空间分布格局,以期为青藏高原东部湿地地表植被的分布格局提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点

研究地点位于青藏高原东缘的甘肃省玛曲县境内的尕斯库勒(34°14'N, 102°20'E),该区域属于尕斯库勒-则岔国家级自然保护区,属于青藏高原气候带,高寒湿润气候区,温带高山森林草地自然带。尕斯库勒年均气温 1.2℃,年平均降水量 781.8 mm,年平均蒸发量

1150.5 mm^[26]

1.2 土壤种子库取样方法

首先将采样区域分为两个部分,第一部分为沉水区域,第二部分为交错区域,沉水区域依据水位梯度的不同在 1.0, 0.5, 0 m 分别设计 3 条样线;交错区域以 0 m 水位线为基准设置两条样线,间距 20 m。整个区域设置 5 条样线,每条样线距离 2 km 设置 1 个样方共 9 个样方,每个样方用采泥器收集 5 个圆柱状土芯混合作为一个样方的土壤样品,每个土芯厚度 5 cm。共收集 45 个土壤样品带回实验室处理。

1.3 种子库筛选、萌发和鉴定

用种子萌发法鉴定种子库的种类组成。样品带回实验室后,将同一样方的土样混匀。土样先经孔径为 0.2 mm 的网筛筛洗,然后平铺到内径为 30 cm 的萌发盒(已装入经 120℃ 烘箱处理 12 h 的沙子作为基质,烘箱处理的目的在于除去沙子中有活力的种子)中,萌发盒中土样层的厚度不超过 1 cm,以保证尽量多数的种子萌发,当土样过多时增加萌发盒数量。处理后的萌发盒随机摆放在武汉植物园温室内,在不供温条件下进行萌发。在萌发过程中每天加水 1 次,始终保持土样湿润。

种子开始萌发后每星期统计一次萌发的物种种类及数量,幼苗一经鉴定即移走,暂不能鉴定的幼苗移栽培养盆中培养至可鉴定为止。不再有新的种子萌发后,再延期一个月结束种子萌发实验。物种鉴定依《中国植物志》。

1.4 种子库基本特征分析

以所萌发物种的种子密度和相对丰富度、不同样带间的总种子密度和总物种数以及相对丰富度表征种子库基本特征。首先将每个萌发盒中萌发的各物种的幼苗数换算成每平方米萌发的幼苗数,并得出每个物种的种子密度,样带的总密度为每个物种种子密度之和,种子库的物种相对丰富度通过相对密度(某个物种的种子密度除以总密度)计算,而样带的相对丰富度由样带的总种子密度除以 5 条样带的总种子密度计算而得。利用独立样本非参数检验中 Kruskal-Wallis 检验比较不同样带间种子密度和物种相对丰富度的差异性;利用单因素方差分析(ANOVA)比较不同区域间物种数的差异。

1.5 不同区域种子库的比较

(i) 种子库的多样性特征. 以 Shannon (*H*)多样性、Simpson (*D*)多样性比较不同样线种子库多样性的差异. Shannon (*H*), Simpson (*D*)多样性通过 PC-ORD 5.0 实现^[27].

(ii) 不同区域物种相似性比较. 利用物种相似性系数(Sørensen's coefficient of similarity)比较每条样线物种水平上种类组成的关系. Sørensen's 相似性系数= $2C/(A+B)$, 其中 *C* 为两个比较对象中共有的物种数, *A* 和 *B* 为两个比较对象中各自的物种数^[28].

(iii) 除趋势对应分析(DCA)排序. 利用每条样线不同样方和物种密度建立物种-样方数据矩阵, 利用该矩阵对所有样方进行 DCA 分析, 同时, 对该数据矩阵进行 TWINSpan 聚类, 通过不同区域样方在排序图上的相对位置以及 TWINSpan 聚类结果, 揭示他们在种类组成上的关系. 分析通过 PC-ORD 5.0 实现^[27].

(iv) 不同区域疏化曲线比较. 分析沉水区域和交错区域物种数与取样个体间的关系, 疏化曲线通

过对取样个体的重新模拟, 解释不同区域物种数与取样个体间的关系. 本研究中主要运用样方曲线 (sample-based curve) 和个体曲线 (individual-based curve) 两类疏化曲线, 表明不同区域在达到相同个体数目时所能容纳的最大物种数^[15]. 疏化曲线通过 EstimateS 7.5^[29] 实现 (<http://viceroy.eeb.uconn.edu/estimates>).

(v) 种子库物种特性的比较. 考虑到植物耐高寒环境的特性, 比较了种子库不同样线间物种生活史周期以及是否为青藏高原所特有, 初步探讨种子库不同样线间植物在物种特性上的差异.

2 结果与分析

2.1 不同区域种子库的基本特征

经过种子库的筛选萌发和鉴定, 第1条、第2条、第4条样线各4个样方, 第3条样线3个样方, 第5条样线6个样方共21个样方萌发出实生苗. 5条样线共发现物种37个(表1), 通过 Kruskal-Wallis 检验结果表明不同样带间平均种子密度($P>0.05$)以及相对丰

表1 尕斯库勒湖湖滨湿地不同区域种子库不同物种种子密度(mean)以及物种丰富度(abun)比较

物种	拉丁名	第1条		第2条		第3条		第4条		第5条	
		Mean (粒 m ⁻²)	Abun	Mean (粒 m ⁻²)	Abun	Mean (粒 m ⁻²)	Abun	Mean (粒 m ⁻²)	Abun	Mean (粒 m ⁻²)	Abun
矮早熟禾 ^{a)}	<i>Poa pumila</i>	49.76	0.63					49.76	0.67	522.49	13.55
棒头草 ^{b)}	<i>Polypogon fugax</i>	49.76	0.63					49.76	0.67		
宝盖草 ^{b)}	<i>Lamium amplexicaule</i>									49.76	0.65
簇生卷耳 ^{b)}	<i>Cerastium caespitosum</i>							398.89	5.37	99.52	2.59
独一味 ^{a)}	<i>Lamiophlomis rotata</i>									49.76	0.65
飞蓬属一种 ^{a)}	<i>Erigeron</i> spp.							49.76	0.67		
狗牙根 ^{a)}	<i>Cynodon dactylon</i>			49.76	0.92	49.76	1.75	49.76	0.67		
葶苈属一种	<i>Rorippa</i> spp.	796.18	1.63			49.76	1.75				
蒿属一种	<i>Artemisia</i> spp.					149.28	3.23	124.43	3.36	124.43	3.23
蒿属第二种	<i>Artemisia</i> spp.									49.76	1.29
黑藻 ^{a)}	<i>Hydrilla verticillata</i>	1144.56	14.47	298.57	11.92						
狐尾藻 ^{a)}	<i>Myriophyllum verticillatum</i>	248.86	6.29								
积雪草 ^{a)}	<i>Centella asiatica</i>	49.76	0.63								
蕨麻 ^{a)}	<i>Potentilla anserina</i>			99.52	3.67			82.94	3.36		
鳢肠 ^{b)}	<i>Eclipta prostrata</i>							49.76	1.34	49.76	0.65
柳叶箬 ^{a)}	<i>Isachne globosa</i>							49.76	1.34		
露蕊乌头 ^{b)}	<i>Aconitum gymnantrum</i>			199.45	3.67	74.64	3.23	895.76	36.24	378.18	24.52
马唐 ^{b)}	<i>Digitaria sanguinalis</i>					49.76	1.75	49.76	1.34	49.76	0.65
毛果婆婆纳 ^{a)}	<i>Veronica eriogyne</i>							49.76	0.67	49.76	0.65

(续表 1)

物种	拉丁名	第 1 条		第 2 条		第 3 条		第 4 条		第 5 条	
		Mean (粒 m ⁻²)	Abun	Mean (粒 m ⁻²)	Abun	Mean (粒 m ⁻²)	Abun	Mean (粒 m ⁻²)	Abun	Mean (粒 m ⁻²)	Abun
毛茛苳 ^{b)*}	<i>Draba eriopoda</i>	49.76	0.63			99.52	2.16	149.28	2.13	149.28	5.86
莓叶委陵菜 ^{a)}	<i>Potentilla fragarioides</i>			99.52	1.83	99.52	2.16	74.64	2.13	99.52	3.88
陌上菜 ^{a)}	<i>Lindernia procumbens</i>	49.76	0.63								
牛毛毡 ^{a)}	<i>Heleocharis yokoscensis</i>	199.45	7.55	149.28	5.55	99.52	2.16	199.45	2.68	597.13	7.74
平车前 ^{b)}	<i>Plantago depressa</i>			49.76	2.75	298.57	12.93	144.98	28.19	124.43	3.23
三裂碱毛茛 ^{a)*}	<i>Halerpestes tricuspis</i>			124.43	4.59	174.16	7.53	74.64	2.13	36.77	18.80
蛇莓 ^{a)}	<i>Duchesnea indica</i>			49.76	0.92						
水葫芦苗 ^{a)}	<i>Halerpestes cymbalaria</i>	49.76	0.63	99.52	3.67	49.76	1.75	74.64	2.13		
水毛茛 ^{a)}	<i>Batrachium bungei</i>	821.59	41.59	696.66	51.38	49.76	1.75	99.52	1.34	49.76	0.65
短叶水蜈蚣 ^{a)}	<i>Kyllinga brevifolia</i>					49.76	1.75				
碎米荠 ^{b)}	<i>Cardamine hirsuta</i>					49.76	1.75				
薹草属一种 ^{a)}	<i>Carex</i> spp.	99.52	1.26	99.52	1.83						
天蓝苜蓿 ^{b)}	<i>Medicago lupulina</i>									49.76	0.65
未知	unknown							99.52	1.34	99.52	1.29
无芒稗 ^{b)}	<i>Echinochloa crusgali</i>	49.76	0.63								
玄参科一种	A species of Scrophulariaceae			49.76	0.92						
早熟禾 ^{b)}	<i>Poa annua</i>	49.76	0.63					49.76	1.34	223.93	5.86
沼生薹菜 ^{b)}	<i>Rorippa islandica</i>	273.69	13.84	199.45	7.34	912.29	59.14	49.76	1.34	99.52	3.88
总幼苗密度	Total seedling density	3981.93	0.28	2264.96	0.16	2255.84	0.16	2916.31	0.20	2952.82	0.21
总物种数	Total species number		15		14		15		22		20

a) 多年生; b) 一年生或两年生; * 高原特有

富度($P>0.05$)差异不明显; 其物种数在沉水区 3 个条带不高于 15 种, 而交错区的物种数不低于 20 种, 两者差异显著($P=0.005$).

2.2 不同区域种子库的比较

不同样线间多样性比较结果表明(表 2), 第 4, 5 条样线的多样性高于前 3 条样线, 说明交错区的物种多样性高于沉水区. 物种相似性比较结果表明, 第 1 条样线的物种相似性与其他样线差异较大, 而第 2~5 条样线的物种相似性较高且差异较小(表 3).

以样方为单位基于 TWINSpan 聚类进行的 DCA

表 2 尕海种子库不同样线间物种多样性比较

样线	H	D
第 1 条	0.091	0.0550
第 2 条	0.127	0.0781
第 3 条	0.064	0.0429
第 4 条	0.215	0.1457
第 5 条	0.242	0.1499

表 3 尕海种子库不同样线间物种种类组成的相似性比较

	第 1 条	第 2 条	第 3 条	第 4 条	第 5 条
第 1 条		0.39	0.39	0.42	0.33
第 2 条			0.60	0.54	0.40
第 3 条				0.63	0.56
第 4 条					0.74
第 5 条					

分析的结果表明(图 1), 第 1, 2 条以及第 3 条样线的第 1 个样方首先聚合在一起, 第 4, 5 条以及第 3 条样线余下的样方在一级水平上被划分为两群, 而在 2~4 级水平上的 TWINSpan 聚类并未将不同样线的样方区分开来.

经过种子萌发, 每条样线产生实生苗的样方数较少(仅 3~6 个), 因此, 在进行疏化曲线分析时, 比较了沉水区和交错区的差异, 结果表明: 为获得调查所观测到的最大物种数, 沉水区为 361 个个体, 旱生区为 304 个个体; 沉水区疏化曲线个体与样方之间的垂直距离大于旱生区域, 并随着取样个体的增加而逐

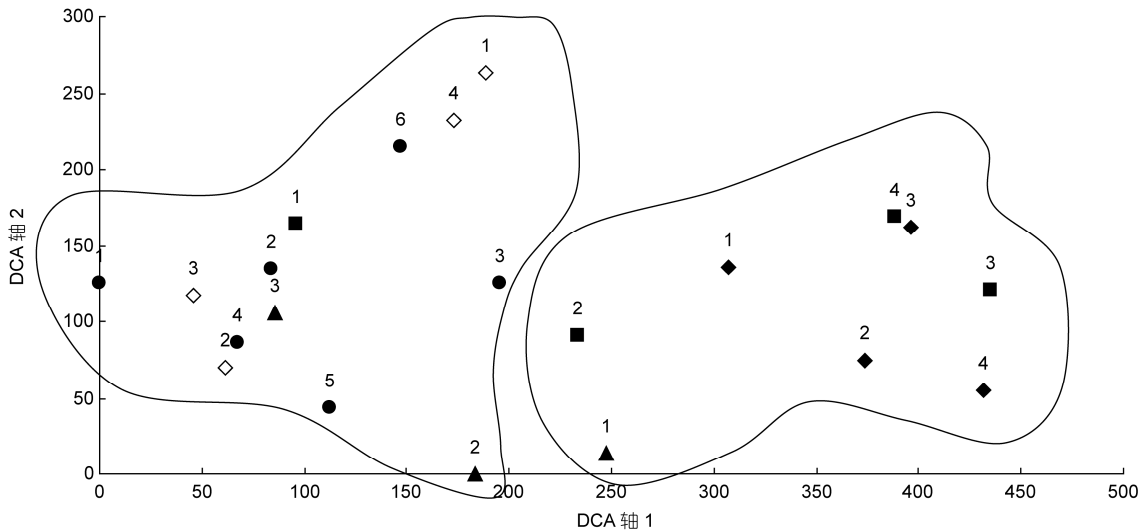


图1 基于21个样方尕海种子库不同样线间的DCA分析

◆表示第1条样线, ■表示第2条样线, ▲表示第3条样线, ◇表示第4条样线, ●表示第5条样线, 1~6表示不同样带的样方编号

渐增大(图2). 结果表明, 在达到相同个体数时, 沉水区所能容纳的最大物种数将大于交错区.

考虑到青藏高原高寒环境对种子库的影响, 对鉴定到种级别共计30个物种(表1)的生活史周期以及是否为高原特有等特性进行了分析. 结果表明, 多年生的物种数在各个样线间差异不大, 然而, 对于一年生或两年生物种的物种数以及高原所特有的物种数, 第4, 5条样线高于前3条样线, 表明交错区的一年生物种以及高原特有物种多于沉水区(图3).

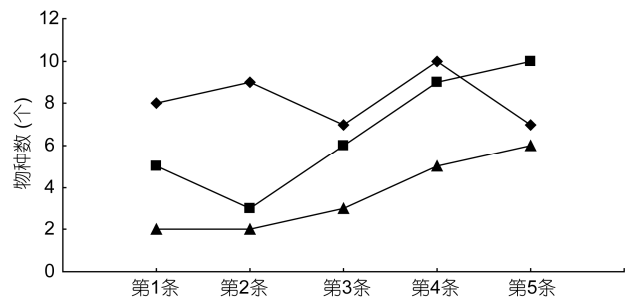


图3 不同样线间物种生活史周期以及高原特有物种数比较

◆表示多年生, ■表示一年生或两年生, ▲表示高原特有

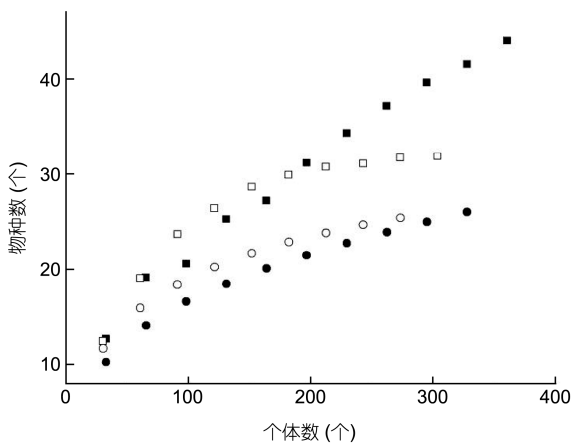


图2 尕海种子库不同区域物种数量随个体数量积累变化的物种疏化曲线

方框表示以个体为基础, 圆圈表示以样方为基础, 实心表示沉水区, 空心表示交错区

3 讨论

本研究以尕海湖滨湿地种子库为例, 通过对不同水位梯度样线种子库组成、丰富度、多样性、物种特性等的分析比较, 结果表明, 青藏高原高寒湿地种子库沿水位梯度存在沉水区和交错区两个不同区域间的带状分布格局.

首先, 对收集的共45个样方的土壤样品进行萌发实验, 仅21个样方萌发出物种, 对种子密度的统计结果表明5个样线的种子密度为2200~4000粒 m^{-2} , 该结果小于长江中下游种子密度6660(SE)粒 $m^{-2} \pm 1130$ (SE)粒 m^{-2} ^[30], 该结论也符合高寒地区种子库密度较小的观点^[31], 这也与前期对尕海种子库基本特征的研究结果相一致^[32]. 尽管总体偏小, 但是总种子密度在第1条样线即1.0 m水深时最大, 产生该现象

的原因可能是由于尕海处于高海拔高寒地区, 常年较低的水温(1.2℃)以及水环境的相对稳定性, 增加了种子的活性和持久性, 减缓种子的萌发, 使得沉水区土壤种子库中的种子密度可以逐渐积累^[33-35]. 而从物种数上看, 沉水区的物种数显著小于交错区, 这可能与水位的周期性变化以及水流的作用导致不同物种在该区域聚集的结果有关.

除种子库基本特征以外, 本研究比较了不同区域种子库的差异. 种子库基本特征相类似, 在多样性方面, Shannon (*H*)和 Simpson (*D*)多样性以及物种相似性((Sørensen's coefficient of similarity)比较结果表明, 种子库在不同区域间存在较大差异, 但是在区域内不同样线间的差异较小, 同时 DCA 和 TWINSpan 聚类结果也证实了以上结论. 产生该现象的原因可能有几个方面: (1) 与基本特征的结论相类似, 可能是由于沉水区水环境的相对稳定而交错区具有水流和水位变化等的作用而形成差异, DCA 分析可以初步判断区分为两个斑块的原因可能来自于水位及水流的作用, 同时由于某些特定物种在水环境和陆生环境中具有较强的环境专一性, 其萌发和定植均受到一定影响, 进而影响了种子库的积累^[36-38]. (2) 可能与植物自身繁殖方式的比例有关, 在交错区等较为异质性的环境中, 植物可能增加对有性繁殖的投入来增加更多的种子以产生更多适应环境的基因型^[25], 而在沉水区相对稳定的环境中, 植物可能通过增加对无性繁殖的投入来维持种群在时间和空间上的扩张^[39], 因此, 不同的繁殖分配比例加剧了种子库在不同区域间的差异.

疏化曲线利用现有数据对个体的重新模拟, 解释不同区域在达到一定个体数时所能形成的最大物种数. 本研究结果表明, 不同区域间疏化曲线的积累速率差异较为明显, 在积累到达最大个体数时, 沉水区将比旱生区获得更多的物种数, 该结论与低海拔平原湿地结论相类似^[27]. 而产生该现象的原因可能是与低海拔区域相比, 高海拔区域沉水区的水环境对外界环境的缓冲作用较大, 所能容纳的物种数更多.

通过对植物生活史周期和物种种类是否为青藏高原所特有的分析, 表明随着样带水位的降低, 一年生或两年生的物种逐渐增加, 青藏高原特有物种种类也随之增加. 与其他低海拔区域不同, 青藏高原常年低温是其显著特征(尕海年平均气温 1.2℃)之一, 在其作用下, 生活史周期较短的植物类群更能适应环境, 因为它们能迅速完成全部生活史并产生后代; 与此相类似, 青藏高原特有物种是在漫长进化过程中形成的、对低温等高原环境具有适应性的类群, 其物种数量的多少也能反映高原环境的好坏. 在青藏高原长期低温环境中, 水环境对低温具有极好的缓冲作用, 使得沉水区相对于交错区而言更加稳定, 因此一年生或两年生物种或者青藏高原特有物种少于交错区. 因此, 青藏高原长期的低温可能对种子库中物种种类沿水位梯度的分布产生影响.

以上不同层次的研究表明, 与低海拔湿地相比, 尽管青藏高原同时存在低温、高海拔等环境因子的影响, 其湿地种子库沿水位梯度呈现一定的带状分布格局, 这一格局的存在使得地表植被也存在沿水位梯度带状分布特征的潜力.

参考文献

- 1 Costanza R, Drge R, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260
- 2 Hansson L A, Bronmark C P, Nilsson A, et al. Conflicting demands on wetland ecosystem services: Nutrient retention, biodiversity or both? *Freshw Biol*, 2005, 50: 705-714
- 3 Zedler J B. Progress in wetland restoration ecology. *Trends Ecol Evol*, 2000, 15: 402-407
- 4 郑姚闽, 张海英, 牛振国, 等. 中国国家级湿地自然保护区保护成效初步评估. *科学通报*, 2012, 57: 207-230
- 5 陈家宽. 揭开中国自然湿地保护历史的新篇章. *科学通报*, 2012, 57: 205-206
- 6 郑姚闽, 牛振国, 宫鹏. 对《〈中国国家级湿地自然保护区保护成效初步评估〉中的偏差》一文的回应. *科学通报*, 2012, 57: 1371-1376
- 7 郑姚闽, 牛振国, 宫鹏, 等. 湿地碳计量方法及中国湿地有机碳库初步估计. *科学通报*, 2013, 58: 170-180
- 8 Keddy P A. *Wetland Ecology: Principles and Conservation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- 9 Bakker J P. *Nature Management by Grazing and Cutting*. Dordrecht: Kluwer, 1989
- 10 Wilson S D, Moore D R J, Keddy P A. Relationship of marsh seed banks to vegetation patterns along environment gradients. *Freshw Biol*, 1993, 29: 361-370

- 11 Brown S C. Remnant seed bank s and vegetation as predictors of restored marsh vegetation. *Can J Bot*, 1998, 76: 620–629
- 12 Hyatt L A. Differences between seed bank composition and field recruitment in a temperate zone deciduous forest. *Am Midl Nat*, 1999, 142: 31–38
- 13 Thompson K, Bakker J P, Bekker R M. *The Soil Seed Banks of North West Europe: Methodology, Density and Longevity*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997
- 14 牛振国, 张海英, 王显威, 等. 1978~2008 年中国湿地类型变化. *科学通报*, 2012, 57: 1400–1411
- 15 崔保山, 翟红娟. 高原湿地功能退化的表征及其恢复中的生态需水量. *科学通报*, 2006, 51: 106–113
- 16 马妙君, 周显辉, 吕正文, 等. 青藏高原东缘封育和退化高寒草甸种子库差异. *生态学报*, 2009, 29: 3658–3664
- 17 刘贵华. 长江中下游湿地的种子库研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2006
- 18 Thompson K, Grime J P. Seasonal variation in the seed banks of herbaceous species in ten contrasting habitats. *J Ecol*, 1979, 67: 893–921
- 19 李伟, 刘贵华, 周进, 等. 淡水湿地种子库研究综述. *生态学报*, 2002, 22: 395–402
- 20 Welling C H, Pederson R L, van der Valk A G. Recruitment from the seed bank and the development of zonation of emergent vegetation during a drawdown in a prairie wetland. *J Ecol*, 1988, 76: 483–496
- 21 Middleton B. *Wetland Restoration, Flood Pulsing, and Disturbance Dynamics*. New York: John Wiley & Sons, 1999
- 22 Boedeltje G, Bakker J P, Bekker R, et al. Plant dispersal in a lowland stream in relation to the occurrence and three specific life-history traits of the species in the species pool. *J Ecol*, 2003, 91: 855–866
- 23 van der Valk A G, Davis C B. The role of seed banks in the vegetation dynamics of prairie glacial marshes. *Ecology*, 1978, 59: 322–335
- 24 Ma M J, Zhou X H, Du G Z. Soil seed bank dynamics in alpine wetland succession on the Tibetan Plateau. *Plant Soil*, 2011, 346: 19–28
- 25 Philbrick C T, Les D H. Evolution of aquatic angiosperm reproductive systems. *Bioscience*, 1996, 46: 813–826
- 26 段丽洁, 张镭, 李英华, 等. 环境变化与尕斯库勒湖自然保护区维护. *干旱气象*, 2005, 3: 53–57
- 27 McCune B, Mefford M J. *PC-ORD: Multivariate analysis of ecological data*. Version 5.0. Lincoln (Oregon): MjM Software, 1999
- 28 Sørensen T. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content and its application to analyses of the vegetation on Danish commons. *D Biol Skrifter Dan Vid Selsk*, 1948, 5: 1–34
- 29 Colwell R K. *EstimateS: Statistical estimation of species richness and shared species from samples*. Version 7.5. 2005
- 30 Liu G H, Li W, Li E H, et al. Landscape-scale variation in seed banks of floodplain wetlands with contrasting hydrology in China. *Freshw Biol*, 2006, 51: 1862–1878
- 31 Archibold O W. A comparison of seed reserves in arctic, subarctic and alpine soils. *Can Field Nat*, 1984, 98: 337–344
- 32 徐凌霄, 程玉, 刘帆, 等. 尕斯库勒湖滨湿地种子库初探. *植物科学学报*, 2011, 29: 589–598
- 33 Milberg P. Soil seed bank after eighteen years of succession from grassland to forest. *Oikos*, 1995, 72: 3–13
- 34 Peco B, Ortega M, Levassor C. Similarity between seed bank and vegetation in Mediterranean grass land: A predictive model. *J Veg Sci*, 1998, 9: 815–828
- 35 Murdoch A J, Ellis R M. Dormancy, viability and longevity. In: Fenner M, ed. *Seeds: The Ecology of Regeneration in Plant Communities*. Wallingford: CAB International, 2000. 183–214
- 36 Keddy P A, Reznicek A A. The role of seed banks in the persistence of Ontario's coastal plain flora. *Am J Bot*, 1982, 69: 13–22
- 37 Leck M A, Simpson R L. Tidal freshwater wetland zonation: Seed and seedling dynamics. *Aquat Bot*, 1994, 47: 61–75
- 38 Yuan L Y, Liu G H, Li W, et al. Seed bank variation along a water depth gradient in a subtropical lakeshore marsh, Longgan Lake, China. *Plant Ecol*, 2007, 189: 127–137
- 39 Bierzychudek F. Patterns in plant parthenogenesis. *Experientia*, 1985, 41: 1255–1264

Heterogeneity in the seed bank along the water gradient of the Gahai Lake wetland on the eastern Qinghai-Tibet Plateau

LIU Fan^{1,2}, LIU Hui³, XU LingXiang^{1,2}, CHENG Yu^{1,2} & LI Wei^{1,2}

¹Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China;

²Hubei Key Laboratory of Wetland Evolution & Ecological Restoration, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China;

³Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources & Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, China

In recent years, wetland biodiversity and vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau have been severely degraded. The seed bank is one of the most important resources available to aid recovery of degraded wetland plant communities. Studies of seed bank heterogeneity are crucial for understanding population formation, vegetation succession, and dynamics. In this study, we investigated the seed bank along water gradients of the Gahai Lake wetland on the eastern Qinghai-Tibet Plateau. We established three sampling lines in lakeside zones and two sampling lines in submerged zones, and looked for differences between lakeside and submerged zones. Seed bank species number and evenness were the same among different sampling lines and different zones, whereas Shannon's (H) and Simpson's (D) formulas revealed that diversity was higher in the lakeside zone than in the submerged zone. A comparison based on Sørensen's index indicated the least diverse along the first sampling line. DCA and TWINSpan analyses separated the sampled species into two clusters: a group consisting of the first and second sampling lines and the first sample of the third line, and a group comprising the remaining samples. Based on species rarefaction curves, more species were found to occur in submerged zones than lakeside zones, although frequency of presence of species found in both zones was similar. Comparisons of species' life histories and plateau endemism revealed that the number of endemic species in the fourth and fifth sampling lines was higher than in the first three lines. Our results indicate that a vegetational zonation pattern based on water gradients exists around Gahai Lake.

Gahai, Qinghai-Tibet Plateau, seed bank, wetland, heterogeneity

doi: 10.1360/972012-1510