

石羊河流域中下游湿地 - 荒漠芦苇种群生长特征研究

张裕年^{1,2}, 满多清^{1,2*}, 韩福贵^{1,2}, 郑庆中^{1,2}, 肖斌^{1,2}, 付贵全^{1,2}, 杜娟^{1,2}, 宋龙龙^{1,2}, 王晓琴^{1,2}

¹甘肃省治沙研究所, 甘肃 兰州

²甘肃省沙生植物工程技术研究中心, 甘肃 兰州

Email: zynzl123@126.com, *mandq318@126.com

收稿日期: 2020年12月7日; 录用日期: 2021年1月4日; 发布日期: 2021年1月11日

摘要

芦苇是石羊河流域荒漠区主要建群植物种群, 从湿地到雨养荒漠区均有分布, 并随水文、土壤、气候、植被等生境因子变化而形成了不同的生态型。研究表明: 荒漠湿地芦苇密集分布, 生长最为旺盛, 地下水位在2 m以内多芦苇优势植物群落, 并随着离湿地水面距离增加, 地下水位下降, 芦苇种群密度、生长量减低, 植被覆盖度也逐渐降低, 直至雨养荒漠区都有稀疏或零星的芦苇生长; 同时, 土壤盐分、pH值也抑制着芦苇种群的生长发育, 其水、盐、干旱三大因素显著影响着芦苇的分布与生长发育。

关键词

石羊河流域, 湿地 - 荒漠, 芦苇种群, 生长特征

A Research on Growth Characteristics of *Phragmites australis* Population from Wetland to Desert in Middle and Lower Reaches of Shiyang River Water-Shed Area

Yunian Zhang^{1,2}, Duoqing Man^{1,2*}, Fugui Han^{1,2}, Qingzhong Zheng^{1,2}, Bin Xiao^{1,2},
Guiquan Fu^{1,2}, Juan Du^{1,2}, Longlong Song^{1,2}, Xiaoqin Wang^{1,2}

¹Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou Gansu

²Gansu Desert Plant Engineering Research Center, Lanzhou Gansu

Email: zynzl123@126.com, *mandq318@126.com

Received: Dec. 7th, 2020; accepted: Jan. 4th, 2021; published: Jan. 11th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 张裕年, 满多清, 韩福贵, 郑庆中, 肖斌, 付贵全, 杜娟, 宋龙龙, 王晓琴. 石羊河流域中下游湿地 - 荒漠芦苇种群生长特征研究[J]. 植物学研究, 2021, 10(1): 19-26. DOI: 10.12677/br.2021.101004

Abstract

Phragmites australis is the dominant population of desert vegetation communities in Shiyang River water-shed area, it is distributed extensively from wetland to rain-fed desert areas, changed with habitat factors of hydrology, soil, climate and vegetation and formed some different eco-types. The research showed that *Phragmites australis* communities are densely distributed, growth is the best in the wetland and more its communities when groundwater table is less than 2 m, with the distance increasing to the water area, groundwater table declines, its population density, growth and vegetation coverage are reduced; in the meanwhile, soil salt content, pH value are also limited its distribution and growth, the three key factors of habitat hydrology, salt and drought limited the distribution and growth obviously.

Keywords

Shiyang River Water-Shed Area, Wetland to Desert, *Phragmites australis* Population, Growth Characteristics

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

芦苇(*Phragmites australis*)生态幅极广,从海洋到荒漠均有分布,具有极强的生态适应能力和生态价值,是干旱区内陆河湿地-荒漠分布最广的植物种群之一[1] [2] [3] [4],并在调蓄洪水、防洪排涝、净化污水,提供食物、防风固沙、生态修复、美化环境等方面具有重要作用。芦苇的叶、茎、根状茎具有通气组织,营养繁殖能力强,自然种群主要以克隆繁殖更新为主,尽管对芦苇的资源分布、生理生态、克隆多样性、种群遗传结构、生态系统功能及经济价值等方面做了大量研究,而不同生境中芦苇的生态适应性差异明显,表现在种群密度、个体枝叶及生长状况的不同[4] [5] [6]。干旱区内陆河流域湿地是荒漠区重要的水源涵养地、生态屏障和生物多样性栖息地,在维护荒漠生态安全、气候安全、水文安全和生物多样性等方面发挥着不可替代的作用[7] [8] [9]。开展内陆河流域湿地-荒漠芦苇种群生长特征与生态适应性研究,对不同生境下芦苇的生长差异及其生态适应性机理进行探索,对荒漠区生态建设具有重要意义。

2. 研究区自然概况

石羊河流域地处巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠及走廊荒漠戈壁的包围之中,由祁连山高山冰雪融水的8条河流进入走廊荒漠平原的武威盆地和民勤盆地,并在民勤盆地汇成石羊河,在中下游形成众多湖泊和终端尾间湖,古代湖泊水面大,但随着长期气候干旱化和绿洲扩展,于1958年尾间的青土湖完全干涸,大面积草甸植被退化和消失,变成沙区。区域内年均气温7.6℃;年均降水量110.2 mm,年均蒸发量2643.9 mm,年均相对湿度51%,干燥度5.3,无霜期175 d;多西北风,多年平均大风日数26.3 d,沙尘暴25 d,扬沙37.5 d,浮尘29.7 d,年平均风速2.4 m/s,起沙风速4.5 m/s。土壤主要以风沙土为主,盐土有草甸盐土、荒漠化盐土和荒漠化潜育盐土;耕作土壤有灌淤土、潮土两个土类。自然植被稀疏,以沙旱生、强旱生、超旱生荒漠植物为主。2010年以来,随着流域统筹用水与调水工程实施,流入民勤盆地的水量增加,青土湖人工注水,湖面逐年增大,形成了一定面积的水生、中生植被,也随着地下水位上升,区域沙旱生植被有一定恢复。

3. 研究方法

2018~2020年6月,以湿地-荒漠调查数据为基础,在石羊河流域中下游的河岸带(洪水河与石羊河交汇地带)、红崖山水库岸带(石羊河入库地带)及青土湖区各选择典型样地1处,并随离河岸、湿地到荒漠的距离内设置5~6个样方(10×10 m),每个样方3个重复;植被密集区观测时,在样方内按对角线随机取1×1 m的5个小样方进行芦苇生长状况观测,包括株数、株高、冠幅,取其平均值,计算小样方中各项指标,植被稀疏区进行样方内所有芦苇观测;同时,也进行了样地其它植物生长状况、植被覆盖度、土地水文、土壤盐分监测,分析芦苇在湿地-荒漠中的分布和生长状况。

4. 结果与分析

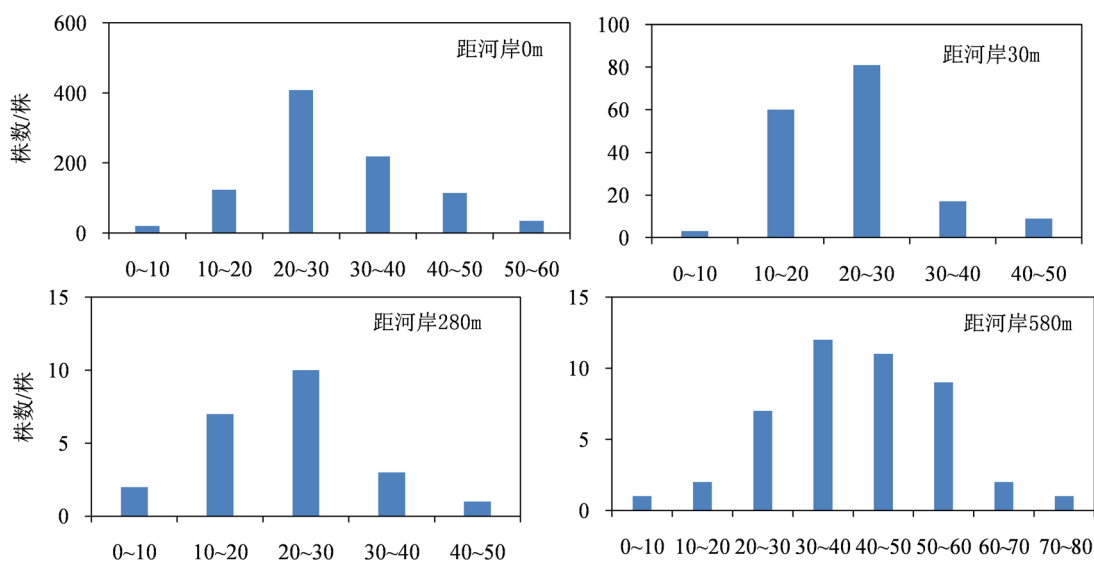
4.1. 河岸带区的芦苇种群数量与生长特征

经河岸带样方调查:河漫滩芦苇单优群落中,芦苇密集生长,样方内有芦苇920株,株高15~60 cm,平均高23.60 cm,形成芦苇湿地草甸;距河岸30 m处有芦苇170株,株高10~50 cm、平均高28.9 cm;280m处有23株,株高20~50 cm、平均高23.7 cm,优势种沙蒿生长旺盛;580 m处有47株,株高30~80 cm、平均38.5 cm;1200 m处有20株,株高20~40 cm、平均20.30 cm(见表1)。研究表明:河漫滩芦苇密度最大,随着离河岸距离增加,植物群落中的芦苇种群数量逐渐降低,生长高度出现低-高-低趋势,植被覆盖度减小(见图1)。

Table 1. The vegetation condition at different distance samples in river bank belt

表 1. 河岸带区不同距离样方内植被情况

编号	离河岸距离(m)	群落植被特征	植被覆盖度(%)
1	0(河漫滩)	芦苇群落,伴生蕹草、赖草、车前、西伯利亚滨藜等	75~95
2	30	芦苇优势种群,伴生猪毛菜、芨芨草、油蒿、五星蒿等	60~80
3	280	沙蒿、芦苇为优势种群,伴生白刺、黄芪、芨芨草、沙米、赖草等	40~65
4	580	芦苇优势种,伴生梭梭、白刺、沙蒿、沙生针茅、砂蓝刺头、紫菀木、黄芪、苦豆子、披针叶黄花、沙米、盐生草、刺蓬等	25~40
5	1200	藜子朴为优势种群,伴生芦苇、沙蒿、沙米、罗布麻、紫菀木等	20~30



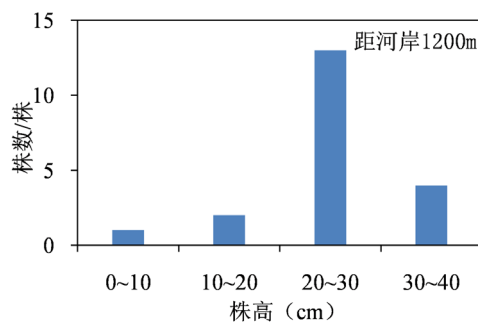


Figure 1. A height frequency distribution of *Phragmites australis* at different distance in the river bank belt
图 1. 距河岸不同距离芦苇株高频数分布

4.2. 水库区岸带芦苇种群数量与生长状况

入库区河漫滩芦苇优势群落中, 芦苇密集生长, 样方内有芦苇 1150 株, 株高集中分布在 20~60 cm, 形成以芦苇为主的湿地草甸; 距河岸 100 m 样方内土壤盐分表聚, 有芦苇 215 株, 株高 10~28 cm; 距河岸 300 m 处样方内有 53 株, 株高 9~25 cm, 优势种芨芨草生长良好; 距河岸 700 m 样方内有 38 株, 株高 20~50 cm; 距河岸 1500 m 样方内有 16 株, 株高 15~30 cm。

石羊河入库区常年水面较大, 岸带与水面间有 4~5 m 高差, 也就是河岸带较大距离内地下水位为 4~5 m, 岸带区植被与河漫滩植被差异大, 河漫滩以芦苇为主, 植被盖度大; 近河岸处盐生植物、芦苇较多, 植被盖度较大; 随着离河道距离增加, 地下水位下降, 植物种类趋向于沙旱生, 芦苇种群数量减少, 生长差异明显, 植被盖度随之降低(见表 2)。

Table 2. The vegetation condition in different distance samples to Reservoir bank

表 2. 水库入库区离岸不同距离样方内植被状况

编号	海拔/m	离河岸距离/m	群落植被特征	植被覆盖度(%)
1	1411.4	0 (入库河漫滩)	芦苇优势群落, 伴生西伯利亚滨藜、地肤、鹅绒委陵菜、风毛菊、蘆草、皱叶酸模等	85~95
2	1415.6	100	芦苇、芨芨草群落, 伴生盐爪爪、小果白刺、黑果枸杞、怪柳、红砂、黄花矾松、蒙古鸦葱、骆驼蓬、白刺、盐生草、盐爪爪、赖草等	45~65
3	1415.7	300	芨芨草、芦苇群落, 伴生合头草、珍珠、白刺、蝎虎霸王、红砂、盐爪爪、骆驼蓬、黑果枸杞、蒙古鸦葱、马蔺、盐生草、黄毛头、赖草等	40~50
4	1415.6	700	芨芨草群落, 伴生蒙山莴苣、芦苇、紫菀木、油蒿、沙蒿、黄芪、黑果枸杞、红砂、白刺、骆驼蓬、蝎虎霸王、合头草等	35~45
5	1415.8	1500	芨芨草、沙蒿群落, 伴生红砂、白刺、芦苇、紫菀木、油蒿、骆驼蓬、黄花矾松、黑果枸杞、蝎虎霸王等	30~40

4.3. 青土湖湿地地区芦苇种群生长发育特征

青土湖是石羊河流域海拔最低的尾间湖、盐湖。于 1958 年完全干涸后芦苇草甸植被衰退, 变成以白刺沙包为主的沙区, 形成以沙旱生、盐生植物为主的植物群落, 间有矮小、稀疏的芦苇生存, 植被覆盖度 10%~20%。2010 年开始每年向青土湖持续输水后, 季节性水域面积逐年增加, 区域地下水位上升(见表 3), 原来的白刺等沙旱生植物退出, 芦苇生长发育和面积扩展, 形成芦苇湿地草甸, 植被覆盖度达 40%~70%或更高, 并随着淡水水域面积逐年扩大, 水分充足、土壤盐分降低, 利于湿地内芦苇单优群落的发展。芦苇虽属喜湿植物, 但不喜长期淹水, 在常年积水深度 30 cm 以上的水域中很少或无芦苇生长。在季节性水域湿地外, 随着离水面距离的增加, 地下水位降低, 土壤含盐量大, 芦苇种群数量减少(见表 4)。

Table 3. Water area and ground water-table of Qingtu Lake wetland in recent years**表 3.** 近年来青土湖湿地地区水域面积与地下水位

年份	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2019
水域面积(km ²)	-	-	-	3	10	15	15	22	22.36	25.16	26.6	26.7
地下水位(m)	4.02	3.91	3.88	3.78	3.60	3.48	3.32	3.20	3.14	3.02	2.94	2.91

Table 4. The vegetation condition in different distance to water area of Qingtu Lake**表 4.** 青土湖区离水面不同距离内植被状况

编号	距水面距离/m	群落植被特征	株数/株	高度/cm	植被覆盖度/%
1	0(水边)	芦苇单优群落, 伴生罗布麻、西伯利亚蓼等	470	60~100	40~70
2	30	芦苇优势种群, 伴生盐爪爪、鹅绒藤等	330	40~70	40~60
3	800	盐爪爪群落, 伴生芦苇、白刺、黑果枸杞等	180	15~48	40~55
4	1500	白刺沙包, 伴生芦苇、盐爪爪、黑果枸杞等	110	9~37	20~40
5	2300	黑果枸杞群落, 伴生芦苇、白刺、鹅绒藤等	78	5~20	15~25
6	3000	怪柳群落, 伴生白刺、盐爪爪、黑果枸杞、芦苇等	39	6~15	10~20

芦苇根系多分布在地面以下 30~60 cm 深处, 最深达 250 cm 以上, 210 cm 以下逐渐减少的生物学特性, 决定了其对地下水位的需求[10]。青土湖季节性水面形成区地下水埋深逐年上升(见表 3), 芦苇生长旺盛, 而随距水面距离增加, 地下水位呈梯级下降, 连续输水 10 年后, 在与湿地水面同一海拔高度内, 主要体现在距水面 0~300 m 范围内, 距水面 0~50 m 地下水位在 0~0.75 m, 50~100 m 下降到 1.5 m 内, 150~200 m 下降到 3~5 m, 250~300 m 后下降到 5 m 以下, 接近于原来的地下水位。一般情况下, 地下水位在 0.3~2 m 以内, 多为芦苇占优势的植物群落, 也有土壤含盐量、土壤结构、原生植物群落等限制因素形成其它植被的, 地下水位 2~5 m 及以下时随地下水位下降芦苇种群数量、生物量降低, 植被从芦苇、盐生植物、沙旱生群落向沙旱生、盐生、芦苇变化, 且芦苇越来越稀疏, 株高也随之降低的趋势, 并在荒漠区也有稀疏的雨养芦苇生存生长(见表 4)。

4.4. 湿地土壤 pH 值、电导率与芦苇分布

青土湖原为盐沼, 由于近年来淡水注入, 水面形成区地表层土壤含盐量降低, 在充足的水分条件下芦苇生长发育, 形成芦苇优势群落, 而在离水面一定距离的低洼区, 虽然地下水位很浅, 地表土壤湿润, 但土壤含盐量高, pH 值和电导率高, 形成以典型盐生植物盐爪爪单优植物群落, 无芦苇生长。

从土壤剖面看: 芦苇群落一般是淡水季节性水面形成区, 淡水将盐碱冲洗至土壤深层, 土壤 pH 值在 7.45~8.68、电导率 $147\sim330 \times 10^{-2}$ ms 之间, 且多数表层 0~20 cm 土壤的 pH 值和电导率小于深层; 而盐爪爪植物群落土壤 pH 值在 7.96~9.33、电导率 $245\sim1522 \times 10^{-2}$ ms 之间, 土壤含盐量显著大于芦苇群落区, 且基本为地表土壤 pH 值和电导率大于深层, 是因为地表无淡水水面形成, 是随湖区地下水位上升而上升的, 地表蒸发强烈, 盐分表聚性强形成的, 虽然地下水位高, 但土壤及水分含盐量高于芦苇耐受程度, 盐分限制了芦苇的生长(见表 5), 其间的芦苇 + 盐爪爪群落、芦苇 + 黑果枸杞群落、芦苇 + 怪柳群落、芦苇 + 骆驼刺等是盐生植物与芦苇的过渡区, 其土壤含盐量介于芦苇单优群落和盐爪爪单优群落区。

Table 5. Soil pH value and electric conductivity of *Phragmites australis* and *Kalidium foliatum* community in wetland
表 5. 湿地芦苇、盐爪爪单优群落 pH 值和电导率

样方号	芦苇群落剖面深度/cm	土壤 pH 值	电导率/10 ⁻² ms	盐爪爪群落剖面深度/cm	土壤 pH 值	电导率/10 ⁻² ms
1	0~20	8.39	234	0~20	8.66	364
	20~40	8.50	147	20~40	9.28	264
	40~60	8.68	139	40~60	9.33	1382
2	0~20	7.45	252	0~20	8.19	861
	20~40	7.53	329	20~40	8.12	276
	40~60	7.45	330	40~60	8.19	245
3	0~20	8.35	154	0~20	7.96	1522
	20~40	8.38	277	20~40	8.19	450
	40~60	8.54	222	40~60	8.08	307

4.5. 湿地 - 荒漠芦苇生态型与生长状况

石羊河流域荒漠区从湿地 - 荒漠均有芦苇分布, 淡水沼泽芦苇密集分布, 植株高大, 生物量高, 生长最为旺盛; 轻、中度盐渍化芦苇草甸, 芦苇受土壤、水中盐分影响, 生长弱于淡水沼泽, 其生长发育随盐分含量大小和化学成分而变化, 含盐量低, 生长发育良好, 含盐量较高则生长弱, 分布较稀疏; 重度盐化芦苇草甸中芦苇严重受盐分抑制, 分布稀疏, 生长弱; 在地下水位较浅, 芦苇可利用地下水的沙丘、沙地和荒漠区, 较稀疏的芦苇生长虽然弱于淡水沼泽、轻度盐渍化芦苇草甸, 但生长发育较好, 较密集分布, 并随地下水位下降而衰退; 在地下水位深, 芦苇根系难以利用地下水的雨养区, 芦苇完全靠稀少的降水生长发育, 其根系分布浅, 集中分布于 20~30 cm 土壤中, 吸收非常有限的有效降水, 生长弱, 仅稀疏或零星分布, 降水量大小与土壤保水力决定着其生长与分布(见表 6)。

Table 6. Eco-type and distribution characteristics of *Phragmites australis* from wetland to desert
表 6. 湿地 - 荒漠芦苇生态型与分布区域特征

编号	生态型	分布区域	生境特征	分布特征	形态特征
1	淡水沼泽芦苇	河漫滩、河岸、淡水湿地	季节性淡水水域	密集	植株高大, 叶长而宽, 花序淡棕红色
2	轻、中度盐化芦苇草甸	轻度盐渍化湿地	有季节性轻度盐渍化水域	密集 - 稀疏	植株较矮小, 约 0.5~0.8 m, 叶较细长, 花序淡紫色
3	重度盐化芦苇草甸	重度盐渍化湿地	有季节性重度盐渍化水域	稀疏	植株矮小, 叶片小且坚硬, 少开花
4	沙区芦苇	固定、半固定沙丘、沙地	地下水位较浅, 芦苇可利用	较密集	株高 1~1.5 m, 叶片较长, 花序白色
5	雨养荒漠芦苇	沙地、荒漠、戈壁	地下水位深, 完全雨养	稀疏和零星	植株矮小, 0.15~0.3 m, 根系分布浅, 叶片小、硬, 开花比例少

5. 讨论

芦苇是依水而居的植物, 荒漠湿地主要植被, 荒漠区地表水和地下水位对芦苇的分布与生长起着关键作用[4]。季节性地表水促进芦苇生长, 常年积水区抑制芦苇生长, 地下水位在 2 m 以内多芦苇优势植物群落, 并随着地下水位下降, 芦苇种群优势度降低[4] [6]。芦苇虽是耐盐植物, 但芦苇分布区的土壤水

分、盐分、pH 值等影响着芦苇分布与生长发育,并随土壤含盐量增加,芦苇种群数量减少、生物量降低,内陆盐沼芦苇随逆境胁迫出现了多种芦苇生态变异[4] [6] [8] [11],盐沼中有盐爪爪、芦苇群落,黑果枸杞、芦苇群落等,其土壤含盐量限制着芦苇的生存与生长,而盐爪爪、黑果枸杞等单优群落中,土壤、水中的含盐量大于芦苇耐受程度,芦苇消失。

不同生境如水文、盐度、养分、气候、地理等因子交互影响下形成了芦苇种群的生长发育,其形态、生理或遗传的差异,造就了不同生境芦苇的不同生态型差异,内陆河流域荒漠区芦苇种群分布和生长状况基本表现为:淡水沼泽芦苇 > 轻、中度盐渍化草甸芦苇 > 沙丘芦苇 > 重度盐渍化草甸芦苇 > 雨养荒漠芦苇,并随着内陆河流域干旱程度加强,荒漠区植被普遍退化,芦苇种群数量逐渐减少,芦苇依据区域水文从密集生长、稀疏分布到零星生长,是区域长期环境演化的结果[4] [12] [13] [14]。

6. 结论

芦苇是石羊河流域荒漠主要植物种群,从湿地到雨养荒漠区都有分布,并随水文、土壤、气候等生境因子的变化,形成不同地域生态型。荒漠区河岸、水库岸带及湿地是芦苇密集分布区,且从湿地到雨养荒漠均有分布,是荒漠区主要建群种。研究表明:荒漠区水文是芦苇分布的关键因子,河漫滩及近河、库岸区芦苇密集分布,生长最为旺盛,植被覆盖度最大;随着离河岸距离增加,芦苇种群密度、生长量减少,植被覆盖度降低;荒漠湿地常年积水区芦苇生长受抑制,季节性积水区芦苇生长发育,地下水位在 2 m 以内多芦苇优势植物群落,并随着地下水位降低,芦苇种群优势度降低,植被覆盖度也逐渐降低,直至雨养荒漠区都有稀疏或零星的芦苇生长;同时,芦苇也受土壤盐分、pH 值等生境因子的影响,土壤含盐量增加,其种群密度与生物量降低,直至土壤、水中含盐量大于芦苇耐受程度后,芦苇消失,其水、盐、干旱等因子均显著影响和制约着芦苇的分布与生长发育。

基金项目

由甘肃省重点研发项目(18YF1FA019)资助。

参考文献

- [1] 王涛. 中国沙漠与沙漠化[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2003: 689-698.
- [2] 杨自辉. 民勤沙井子地区 40a 来荒漠植被变迁初探[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 395-398.
- [3] 满多清, 刘世增, 魏振海, 等. 石羊河中下游流域植被的演替历史[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 613-618.
- [4] 庄瑶, 孙一香, 王中生, 等. 芦苇生态型研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(8): 2173-2181.
- [5] 焦亮, 刘雪蕊, 王圣杰, 等. 敦煌阳关湿地芦苇克隆构件空间拓展策略及其对土壤环境因子的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5317-5325.
- [6] 王继伟, 赵成章, 赵连春, 等. 内陆盐沼芦苇根系形态及生物量分配对土壤盐分因子的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4843-4851.
- [7] 赵丽娅, 赵哈林. 我国沙漠化过程中的植被演替研究概述[J]. 中国沙漠, 2000, 20(1): 6-13.
- [8] 王琪, 史基安, 等. 石羊河流域环境现状及其演化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(1): 46-52.
- [9] 康尔泗, 等. 甘肃河西地区内陆河流域荒漠化的水资源问题[J]. 冰川冻土, 2004(12): 663.
- [10] 张娜, 朱阳春, 李志强, 等. 淹水和干旱生境下铅对芦苇生长、生物量分配和光合作用的影响[J]. 植物生态学报, 2018, 42(2): 229-239.
- [11] 贡璐, 朱美玲, 塔里甫拉提·特依拜, 等. 塔里木盆地南缘旱生芦苇生态特征与水盐因子关系[J]. 生态学报, 2014, 34(10): 2509-2518.
- [12] 李群, 赵成章, 王继伟, 等. 张掖湿地芦苇比叶面积和水分利用效率的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(15): 4956-4962.
- [13] 石万里, 刘淑娟, 刘世增, 等. 人工输水对石羊河下游青土湖区域生态环境的影响分析[J]. 生态学报, 2017,

37(18): 5951-5960.

- [14] 王琪, 史基安, 赵兴东, 等. 石羊河流域地下水地球化学特征演化的计算机模拟研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(2): 160-164.