DOI: 10.5846/stxb201403200490
张娟, 贺学礼, 赵丽莉, 许伟, 闫姣.荒漠土壤因子和 DSE 定殖对克隆植物入侵的响应.生态学报,2015,35(4):1095-1103.
Zhang J, He X L, Zhao L L, Xu W, Yan J. Responses of desert soil factors and dark septate endophytes colonization to clonal plants invasion. Acta Ecologica Sinica,2015,35(4):1095-1103.

荒漠土壤因子和 DSE 定殖对克隆植物入侵的响应

张 娟, 贺学礼*, 赵丽莉, 许 伟, 闫 姣
河北大学生命科学学院, 保定 071002

摘要:克隆植物,尤其是游击型克隆植物,具有很强的扩展能力,通过克隆扩展可侵入到不同生境斑块。克隆植物入侵可能会影响入侵地土壤营养状况和微生物群落。为了探明克隆植物入侵对 DSE(dark septate endophytes)活动和土壤理化性质的影响,于 2013 年 6 月在克隆植物羊柴(*Hedysarum laeve*)和沙鞭(*Psammochloa villosa*)群落空地沿根状茎延伸方向设置样方,分别于 6 月、8 月和 10 月在样方内分 0—10、10—20、20—30、30—40、40—50 cm 土层采集土样和根样,研究了不同采样时间羊柴和沙鞭群落空地 DSE 和土壤理化性质时空变化。结果表明,从 6 月到 10 月,随时间后延,克隆植物逐渐侵入群落空地,沙鞭入侵群落空地数和分株数高于羊柴。羊柴群落空地根系 DSE 定殖率随采样时间后延,逐渐降低,最大值在 6 月;沙鞭群落空地根系 DSE 定殖率随采样时间后延,逐渐升高,最大值在 10 月。随着克隆植物入侵,入侵地土壤中可利用的营养物质含量显著提高,羊柴入侵提高了入侵群落空地土壤碱解 N、有效 P 和速效 K 含量,沙鞭入侵提高了入侵群落空地土壤碱解 N 和有效 P 含量。相关性分析表明,羊柴群落空地 DSE 定殖率与土壤 pH 值和电导率显著正相关,沙鞭群落空地 DSE 定殖率与土壤 pH 值极显著负相关,与电导率、碱解 N 和有效 P 极显著正相关。克隆植物入侵使得土壤环境更有利于克隆植物自身生长,为荒漠植被恢复提供了前提。

关键词:克隆植物; 羊柴; 沙鞭; DSE; 荒漠土壤

Responses of desert soil factors and dark septate endophytes colonization to clonal plants invasion

ZHANG Juan, HE Xueli*, ZHAO Lili, XU Wei, YAN Jiao
College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, *China*

Abstract: Desertification is the most severe problem in grasslands and sandlands in north China. In the desertified grassland, seed germination and seedling growth are affected by many ecological factors, such as drought, high temperature, sand burial, and wind and water erosion. In Inner Mongolia grassland of north China, sand burial is a common phenomenon caused by moving sand dunes. Plant shoots, seeds, and seedlings of sand dune plants are often buried by sand. Thus, plants must tolerate sand burial to survive and reproduce in sand dune habitats. Clonal plants, especially guerilla ones, can invade open patches through clonal growth, which may greatly affect soil nutrition status and microbial communities of the invaded sites. Previous study indicated that clonal growth and integration play an important role in their clonal expansion, such as in supporting the survival of new ramet on sand dunes. *Psammochloa villosa* produces linear monopodially growing rhizomes and it mainly relies on clonal growth to sustain and renew its populations. *Hedysarum laeve* is one of the arid-active and sand-fixation plants which can not only conserve soil, but also block the wind, reduce soil erosion, and thus maintain the balance and stability of arid areas. Dark septate endophytes (DSE), a miscellaneous group of ascomycetes, colonize root tissues intracellularly and intercellularly without causing apparent negative effects on the host

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31270460)
收稿日期:2013-03-20; **网络出版日期**:2014-10-17
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xuelh1256@aliyun.com

plant. DSE fungi exhibit a broad range of host plants. DSE may benefit their host plants by facilitating the uptake of water and mineral nutrients from soil, and suppressing infection by plant pathogens. To investigate the effects of the growth of clonal plants on the activities of DSE and soil physical and chemical properties of invaded sites in Inner Mongolia, China, soil samples (0—50 cm depth) were collected under two guerilla-type, rhizomatous clonal plants, *H. laeve* and *P. villosa*, in June, August and October in 2013, respectively. The results showed that the clonal plants gradually invaded the bare spaces of community from June to October. The number of invaded community of *P. villosa* was higher than that of *H. laeve*. DSE colonization in roots of *H. laeve* community declined gradually with the sampling time. The highest colonization rate was found in roots sampled in June. In contrast, DSE colonization of *P. villosa* increased with the sampling time with the peak colonization rate in October. The invasion of clonal plants significantly increased the content of soil available nutrition, such as available N and P, which became more suitable for the growth of clonal plants. DSE colonization rate in *H. laeve* root systems in the bare spaces positively correlated with soil pH and electrical conductivity. Whilst for *P. villosa*, DSE colonization rate had strong negative correlation with soil pH, but had positive correlation with soil electrical conductivity, available N and available P, respectively. We concluded that the invasion of clonal plants greatly affected DSE colonization and soil nutrition status, although such effects varied between different clonal plants. Our findings showed that both clonal plant species enhanced the contents of available nutrients. Clonal plants were superior to non-clonal plants in terms of sand fixation, and greatly improved self-healing ability in adverse environments.

Key Words: clonal plants; *Hedysarum laeve*; *Psammochloa villosa*; DSE; desert soil

克隆植物又称无性系植物,是具有克隆生长习性的植物[1]。克隆植物几乎是所有生态系统的组成成分,克隆植物有较强的适应能力,在极端环境下,更是占据统治地位[2]。根据克隆发生器官不同,克隆植物分为根状茎型、匍匐茎型、球茎型、鳞茎型和根出条型克隆植物等类型[1]。根茎在根茎植物无性繁殖、克隆分株间信息交流和物质交换等方面有重要作用[3]。研究发现,根茎克隆植物具有很强的可塑性,能对资源水平和生境优劣做出反应,施肥可以显著改变克隆植株状态,无性系分株产生能力增强,个体生长旺盛,根系发达,分蘖株数量增加,节间变短[4],因此,根茎对预测资源斑块质量具有重要意义,有关根茎克隆植物的研究涉及生物入侵、全球变化等诸多生态学前沿领域[5]。

克隆植物通过克隆生长,产生与母株相连的新子代分株。克隆植物一旦定居,就能迅速扩展到周围沙地,占据更多水平空间[6]。克隆植物子株与母株在水分和无机盐方面存在广泛的整合作用。因此,可以在以母株为坚实后盾的情况下,对相邻生境入侵,并逐步发展而占据优势,克隆植物可以通过步步为营的生境改造方式逐渐改造所生存环境[7]。前人研究表明,克隆植物侵入灌丛空地后,极大地改善了土壤营养状况,碱解 N、有效 P 和有机质均有不同程度提高[8]。

深色有隔内生真菌(dark septate endophytes,DSE)是指一类定居于植物根内的小型土壤真菌,可以定殖于大多数植物根内,广泛存在于各种受胁迫环境中[9]。研究表明,植物根系与真菌共生复合体在对保护植物免受重金属胁迫中发挥重要作用[10]。盆栽试验表明,DSE 能够增加植物地上部、地下部和总生物量,以及地下部对土壤 N 和 P 的吸收[11]。克隆植物紫茎泽兰入侵后,根际土壤氨氧化细菌、自生固氮菌等有益功能菌群显著高于未被入侵的土著植物根际土,土壤酶活性也表现出增加趋势[12]。克隆植物可能是通过改变土壤微生物群落和土壤酶活性,来改变土壤理化性质,进而影响 DSE 的定殖状况。

不同克隆植物因其自身生物学和生态学特性不同,通过克隆生长形成的基株和克隆整合能力存在差异,侵入空地后与入侵地土著植物间他感作用不同,对入侵地土壤理化性质和 DSE 的影响可能不同。

内蒙古青格勒图位于我国北方干旱半干旱地区,由于受风蚀沙化影响,该地区形成了典型的梁地,梁顶由于海拔较高,所处环境比荒漠草原更为恶劣。克隆植物无性繁殖避开了环境对种子繁殖的不利影响,使得梁地绿化成为可能。梁地土壤类型为沙质土壤,生长着沙生克隆植物,如羊柴和沙鞭群落,群落内有较大的间隔

空地,通过克隆生长能迅速的扩展到周围群落空地。随着克隆植物侵入,群落空地土著植物再生动态必将受到入侵植物的影响[7]。本试验通过对研究样地地形、地貌和入侵状况的实地调查和室内综合分析,研究克隆植物——羊柴和沙鞭入侵对 DSE 定殖和土壤因子的影响,以便为充分利用 DSE 资源,促进克隆植物生长和荒漠植被恢复提供依据。

1　材料与方法

1.1　目标植物

羊柴(*Hedysarum laeve*)属豆科岩黄芪属,多年生落叶半灌木,具典型的游击型构型。根茎分枝类型为合轴型,可通过根茎产生不定根和不定芽,形成新植株。分株间距约 1 m,单个地下根茎长约 80 cm[13]。克隆整合指克隆生理内整合,是植物克隆生长的重要方面,相连分株间的克隆整合可以缓解分株由资源异质性带来的在获取上的差异和环境胁迫[3]。由于羊柴分株间隔长,形态可塑性强,根系发达,入土较深,所以克隆整合能力很强。羊柴作为豆科植物,其根瘤菌可固定大量氮素,使土壤含氮量增加,是我国北方干旱地区广泛推广种植的优良牧草和防风固沙植物,对于改善沙地生态环境有重要意义[14]。

沙鞭(*Psammochloa villosa*)是禾本科沙鞭属根茎型多年生草本植物,具典型的游击型克隆构型。根茎分枝类型为单轴型,同一根茎相继根茎节的芽交替发育成地上绿枝或次生根茎,同一根茎节都产生不定根,分株间距约 20 cm,连续的不定根系层存在于 20—40 cm 土层[15]。由于沙鞭分株间距短,形态可塑性较弱,不定根系入土浅,空间拓展能力非常有限,所以克隆整合能力较弱。沙鞭的克隆生长与克隆整合特性,使其在 水分短缺、营养贫乏以及经常遭受扰动的沙地生境中生存,在改善土壤环境和固沙方面起着重要作用[16]。

1.2　样方设计

研究样地位于内蒙古正蓝旗青格勒图梁地(42°09′ N、115°55′ E),土壤类型为风沙土。2013 年 6 月于梁顶(海拔 1340 m)克隆植物羊柴和沙鞭群落内空地,沿羊柴和沙鞭根状茎延伸方向分别选取 4 块 1 m × 1 m 空地作为固定样方,在选定样方 4 个角分别插上红色标杆作为标记。

1.3　样品采集

2013 年 6 月下旬、8 月下旬和 10 月下旬,在每个固定样方中央按 0—10、10—20、20—30、30—40、40—50 cm 5 个土层分别采集 1 kg 根土混合样,记录采样时间、侵入群落空地克隆植物种类(羊柴和沙鞭)和分株数,样品装入隔热性能良好的塑料袋密封,带回实验室。自然风干后,过 2 mm 细筛分离根样和土样。土样用于土壤理化性质测定,将收集的根样剪成 1 cm 根段,用于 DSE 定殖率测定。

1.4　研究方法

土壤 pH 值用 pHS-3C 数字酸度计测定(土壤:水 = 1 :2.5);电导率用 DDS-11AW 电导仪测定(土壤:水 = 1 :5,去 CO_2的蒸馏水);有机 C 用重铬酸钾氧化法;碱解 N 用碱解扩散法;速效 P 用 $NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法[17];速效 K 用火焰光度法[18]。

根段样品用蒸馏水洗净,放于试管中,加入 10% KOH 浸埋根样,100 ℃加热 1 h 至透明,蒸馏水洗数次后,于 90 ℃酸性品红染色 0.5 h,再用乳酸脱色、制片[19]。每个样品在显微镜下观察 90 条根段,并记录 DSE 定殖情况,按 Biermann 等人方法[20]计算 DSE 定殖率:

$$\text{DSE 定殖率\%} = (\text{侵染根段数}/\text{总根数}) \times 100$$

$$\text{DSE 定殖强度\%} = (\text{侵染根段长度}/\text{侵染根段总长度}) \times 100$$

试验数据经 Execl 处理后,用 SPSS19.0 软件对 DSE 定殖情况和土壤理化性质进行统计分析。主要采用的统计学方法,重复测量的方差分析, 多重比较方法和相关分析方法。

2　结果与分析

2.1　克隆植物入侵状况

由表 1 可知,2013 年 8 月羊柴入侵样方空地数为 1,占 25%,沙鞭入侵样方空地数为 2,占 50%;10 月羊柴

入侵样方空地数为 2,占 50%,沙鞭入侵样方空地数为 4,占 100%。随着时间后延,克隆植物入侵样方空地数逐渐增加,但相同时间内沙鞭入侵样方空地数和分株数高于羊柴。

表 1 克隆植物入侵状况

Table 1 The invaded situation of clonal plants

样地 Sampling sites	不同时间样方内克隆植物分株数 Number of ramets of clonal plants in sample sites in different time		
	2013-06	2013-08	2013-10
羊柴空地 1 *H. laeve* space No.1	0	0	3
羊柴空地 2 *H. laeve* space No.2	0	2	5
羊柴空地 3 *H. laeve* space No.3	0	0	0
羊柴空地 4 *H. laeve* space No.4	0	0	0
沙鞭空地 1 *P. villosa* space No.1	0	3	5
沙鞭空地 2 *P. villosa* space No.2	0	1	3
沙鞭空地 3 *P. villosa* space No.3	0	0	2
沙鞭空地 4 *P. villosa* space No.4	0	0	1

2.2 克隆植物群落空地 DSE 时空分布

经碱解离、酸性品红染色压片后,在羊柴和沙鞭根组织均发现 DSE 有隔菌丝、泡囊和微菌核定殖(图 1),羊柴菌丝、微菌核和泡囊颜色比沙鞭的颜色深,羊柴微菌核和泡囊均大于沙鞭,说明侵染羊柴和沙鞭根际组织 DSE 种类可能存在差异。

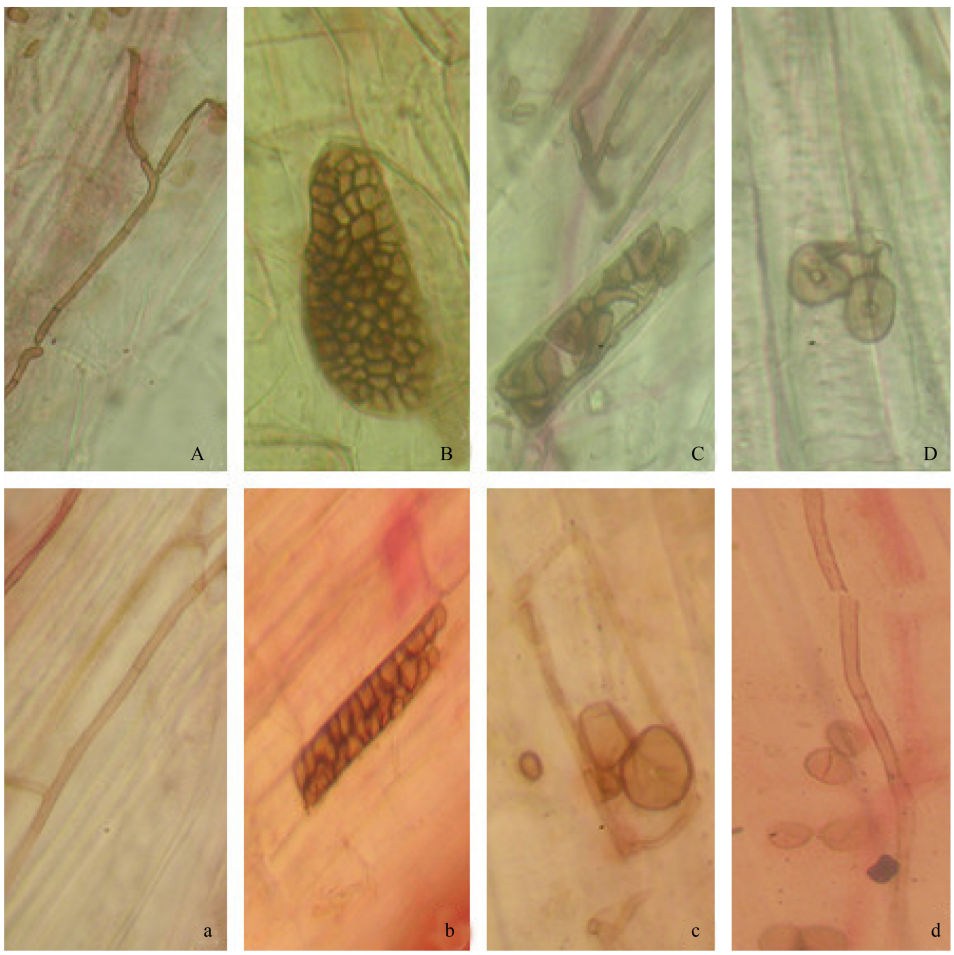

图 1 羊柴和沙鞭群落空地 DSE 共生结构 (×400)

Fig.1 Symbiotic structures of DSE in the blank spaces of *H. laeve* and *P. villosa* community (×400)

大写字母表示羊柴群落空地 DSE 共生结构,小写字母表示沙鞭群落空地 DSE 共生结构; A(a): DSE 有隔菌丝;B(b): DSE 微菌核;C-D(c-d): DSE 泡囊

由图 2 可知,羊柴群落空地 DSE 菌丝、微菌核和总定殖率随时间后延逐渐降低,泡囊定殖率月份间差异不显著,定殖强度先降后升。不同土层 DSE 定殖率和定殖强度随时间变化不同。0—10 cm 土层,DSE 菌丝和总定殖率随时间后延显著降低,微菌核和泡囊定殖率先降后升,定殖强度差异不显著;10—20 cm 土层,DSE 菌丝、微菌核和总定殖率随时间后延逐渐降低,泡囊定殖率和定殖强度先降后升;20—30 cm 土层,DSE 菌丝、微菌核、总定殖率和定殖强度随时间后延逐渐降低,泡囊定殖率先升后降;30—40 cm 土层,DSE 菌丝、总定殖率和定殖强度随时间后延先降后升,微菌核定殖率逐渐降低,泡囊定殖率逐渐升高;40—50 cm 土层,DSE 菌丝定殖率随时间后延先降后升,微菌核和总定殖率逐渐降低,泡囊定殖率和定殖强度先升后降。

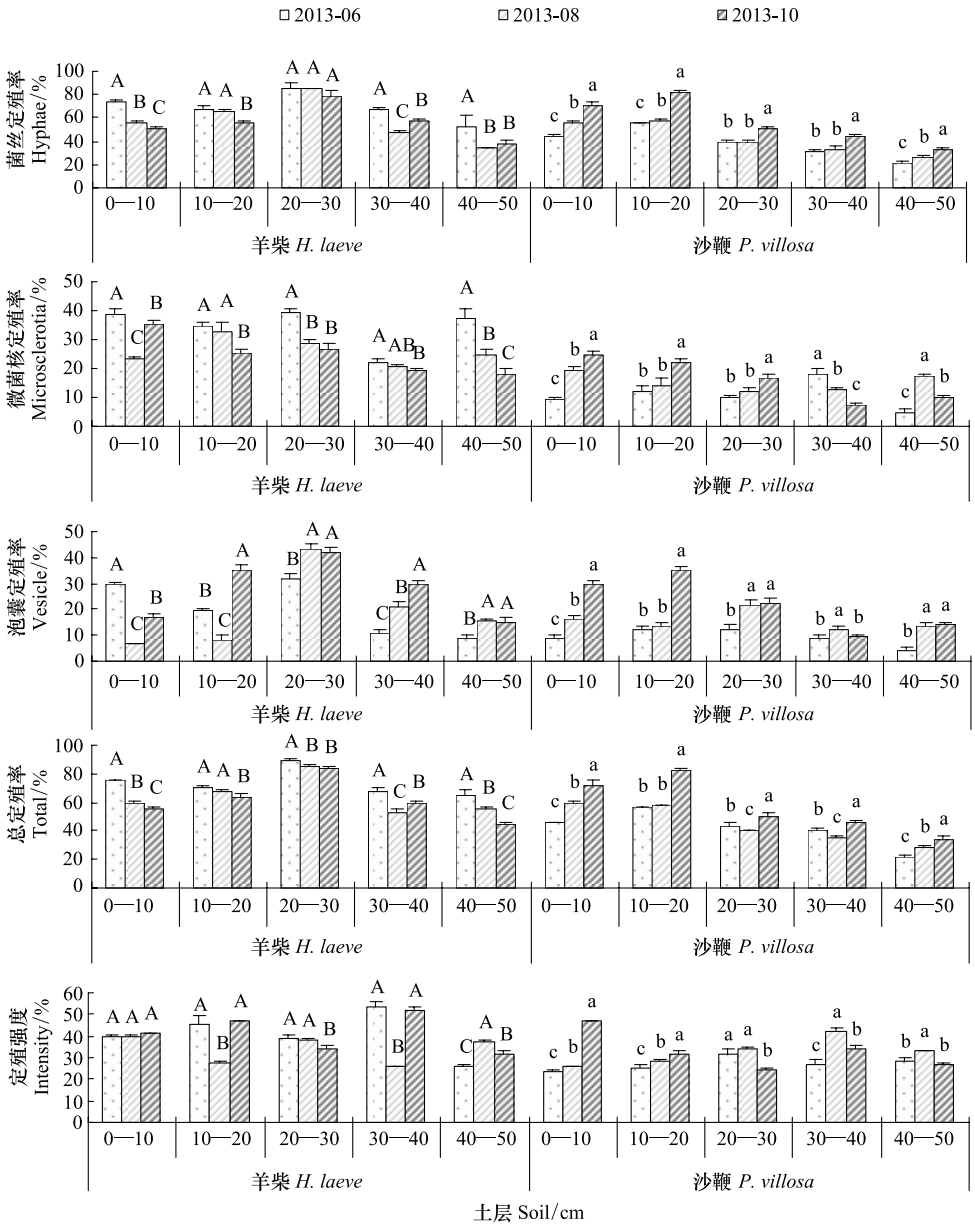

图 2　克隆植物群落空地 DSE 时空分布

Fig.2　Spatio-temporal distribution of DSE in the blank spaces of clonal plants

不同大写字母表示羊柴群落空地 DSE 定殖率差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示沙鞭空地 DSE 定殖率差异显著

沙鞭群落空地 DSE 菌丝、微菌核、泡囊和总定殖率随时间后延逐渐升高,定殖强度先升后降。不同土层 DSE 定殖率和定殖强度随时间后延变化规律不同。0—20 cm 土层,DSE 定殖率和定殖强度随时间后延逐渐升高;20—30 cm 土层,DSE 菌丝、微菌核和泡囊定殖率随时间后延逐渐升高,总定殖率先降后升,定殖强度先

升后降;30—40 cm 土层,DSE 菌丝定殖率随时间后延逐渐升高,微菌核定殖率逐渐降低,泡囊定殖率和定殖强度先升后降,总定殖率先降后升;40—50 cm 土层,DSE 菌丝、泡囊和总定殖率随时间后延逐渐升高,微菌核定殖率和定殖强度先升后降。

2.3 克隆植物群落空地土壤因子时空分布

由图 3 可知,羊柴群落空地土壤因子随羊柴根系入侵表现出明显变化规律。土壤 pH 值和电导率随时间后延逐渐降低;有机 C 先升后降;碱解 N、有效 P 和速效 K 随时间后延逐渐升高。0—50 cm 土层,pH 值和电

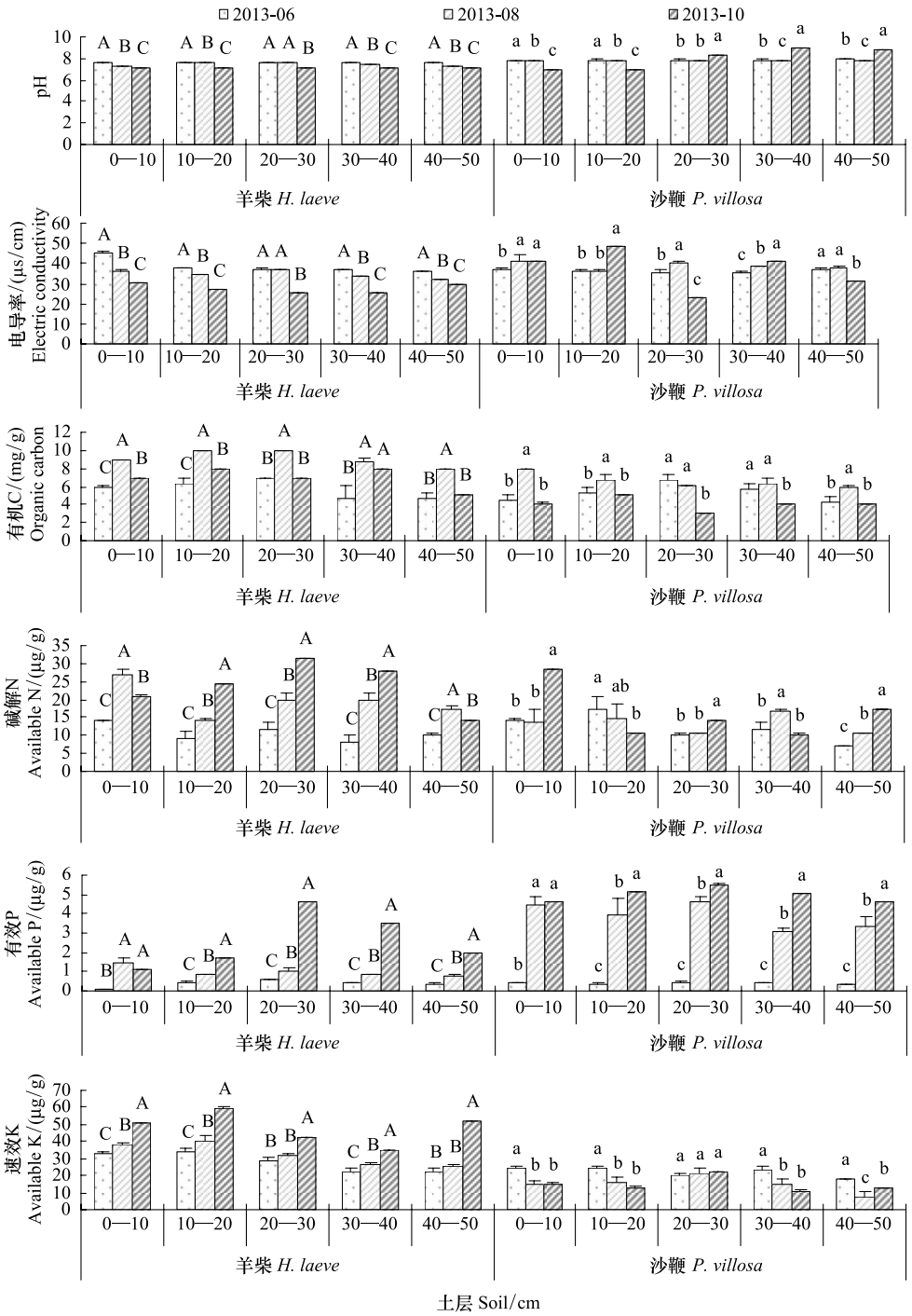

图 3 克隆植物群落空地土壤因子时空分布

Fig.3 Spatio-temporal distribution of soil factor in the blank spaces of clonal plants

导率随时间后延逐渐降低,有机 C 先升后降,速效 K 逐渐升高;0—10 cm 土层,碱解 N 和有效 P 先升后降,10—40 cm 土层碱解 N 和有效 P 逐渐升高, 40—50 cm 土层,碱解 N 先升后降,有效 P 逐渐升高。

沙鞭群落空地土壤因子随沙鞭根系入侵发生明显变化。土壤 pH 值和电导率随时间后延差异不显著,pH 值最大值在 10 月,电导率最大值在 8 月;有机 C 随时间后延先升后降;碱解 N 和有效 P 随时间后延逐渐升高;速效 K 随时间后延先降后升。0—10 cm 土层,pH 值逐渐降低,电导率和有机 C 先升后降,碱解 N 和速效 K 先降后升,有效 P 逐渐升高;10—20 cm 土层,pH 值、碱解 N 和速效 K 逐渐降低,电导率和有效 P 逐渐升高,有机 C 先升后降;20—30 cm 土层,pH 值先降后升,电导率先升后降,有机 C 逐渐降低,碱解 N、有效 P 和速效 K 逐渐升高;30—40 cm 土层,pH 值先降后升,电导率和有效 P 逐渐升高,有机 C 和碱解 N 先升后降,速效 K 逐渐降低;40—50 cm 土层,pH 值和速效 K 先降后升,电导率和有机 C 先升后降,碱解 N 和有效 P 逐渐升高。

2.4　克隆植物群落空地 DSE 定殖与土壤因子相关性分析

由表 2 可知,羊柴群落空地 DSE 菌丝定殖率与土壤 pH 值极显著正相关,与电导率显著正相关;微菌核定殖率与 pH 值和电导率极显著正相关,与碱解 N 和有效 P 极显著负相关;泡囊定殖率与碱解 N 和有效 P 极显著正相关;总定殖率与 pH 值极显著正相关,与电导率显著正相关;定殖强度与土壤因子无显著相关性。

由表 3 可知,沙鞭群落空地 DSE 菌丝和总定殖率与土壤 pH 值极显著负相关,与电导率、碱解 N 和有效 P 极显著正相关;微菌核定殖率与 pH 值极显著负相关,与碱解 N 和有效 P 极显著正相关;泡囊定殖率与 pH 值极显著负相关,与碱解 N 显著正相关,与有效 P 极显著正相关;定殖强度与 pH 值和速效 K 极显著负相关,与电导率和碱解 N 极显著正相关。

表 2　羊柴群落空地 DSE 定殖与土壤因子相关性分析

Table 2　Correlation analysis between DSE and soil factors in the blank spaces of *H. laeve* community

项目 Item	pH	电导率 Electric conductivity	有机 C Organic carbon	碱解 N Available N	有效 P Available P	速效 K Available K
菌丝定殖率 Hyphae	0.550**	0.347*	0.134	−0.029	0.054	−0.165
微菌核定殖率 Microsclerotia	0.542**	0.547**	−0.152	−0.417**	−0.470**	−0.145
泡囊定殖率 Vesicle	−0.077	−0.202	0.211	0.422**	0.446**	0.179
总定殖率 Total	0.563**	0.327*	0.113	−0.039	0.035	−0.244
定殖强度 Intensity	−0.077	−0.075	−0.138	0.065	0.115	0.069

* 表示两者在 $P<0.05$ 水平上有显著相关性; ** 表示两者在 $P<0.01$ 水平上有极显著相关性

表 3　沙鞭群落空地 DSE 定殖与土壤因子相关性分析

Table 3　Correlation analysis between DSE and soil factors in the blank spaces of *P. villosa* community

项目 Item	pH	电导率 Electric conductivity	有机 C Organic carbon	碱解 N Available N	有效 P Available P	速效 K Available K
菌丝定殖率 Hyphae	−0.527**	0.385**	−0.025	0.420**	0.428**	−0.011
微菌核定殖率 Microsclerotia	−0.648**	0.257	0.166	0.450**	0.400**	−0.176
泡囊定殖率 Vesicle	−0.553**	0.287	−0.135	0.362*	0.644**	−0.146
总定殖率 Total	−0.537**	0.401**	0.024	0.415**	0.385**	0.011
定殖强度 Intensity	−0.394**	0.426**	0.029	0.425**	0.287	−0.395**

3　讨论

3.1　克隆植物入侵对 DSE 定殖的影响

羊柴和沙鞭均为根茎游击型克隆植物,克隆植物可以通过水平方向伸长生长及分株实现空间扩展,从而入侵土壤斑块[21]。研究发现,同一时间,羊柴入侵样方空地数和分株数均少于沙鞭,与赵金莉等[8]的研究结果相同,可能是因为内蒙古梁地和毛乌素沙地均为沙质土壤,所处环境相差不大,因此两地克隆植物入侵情况一致。

研究表明[23],DSE 没有区域和季节特异性,可以定殖于本地植物和入侵植物,表明入侵植物能够利用入侵地的 DSE 真菌,DSE 有利于入侵植物对入侵地环境的适应。克隆植物入侵空地后,入侵地羊柴和沙鞭根组织均能被 DSE 侵染,羊柴定殖率为 61.36%,沙鞭为 56.80%,形成菌丝、微菌核和泡囊等典型的 DSE 共生结构。说明 DSE 能与羊柴和沙鞭形成良好共生关系。羊柴 DSE 定殖率高于沙鞭,可能是因为沙鞭地下根茎分枝为单轴型,根茎节产生不定根[15],羊柴为典型的合轴型分枝,分株种群常常具有多层纵横交错的根茎网络[13],羊柴发达的根系更有利于 DSE 侵染。相关研究表明,DSE 可显著提高植株干重、株高、地上部和地下部干重,促进根系生长发育,增加根毛数量[24]。DSE 侵染可使克隆植物更好适应干旱贫瘠的荒漠环境。

3.2 DSE 和土壤因子对克隆植物入侵的响应

克隆植物入侵空地后,入侵地 DSE 定殖率发生显著变化,因克隆植物种类不同,DSE 定殖率变化呈相反规律。羊柴入侵后,入侵地 DSE 定殖率逐渐降低;沙鞭入侵后,入侵地 DSE 定殖率反而升高。推测可能存在以下原因:第一,随着克隆植物侵入群落空地,克隆植物与空地土著植物间发生他感作用,若二者间他感作用表现为抑制作用,则克隆植物入侵抑制土著植物生长,导致空地根系 DSE 定殖率降低;若二者间表现为促进作用,则克隆植物入侵促进土著植物生长,使空地根系 DSE 定殖率升高。第二,克隆植物侵入群落空地后,由于根系分泌物的作用,使空地土壤理化性质发生变化,环境因子是影响 DSE 定殖的一个重要因素,遵循适者生存,不适者被淘汰的原则,故空地 DSE 定殖率存在差异。DSE 与植物相互作用受宿主植物和环境因子影响[11]。入侵植物可以影响入侵地土壤微生物群落,通过强化其根际土壤微生物群落演替,为进一步入侵创造有利的土壤微环境[25]。

土壤是生态系统赖以存在的最重要载体之一,地上植物与地下土壤间通过根系及其植物残体分解发生相互作用[26]。地面群落组成成分发生改变,则地上植物与地下土壤间的互作效应也会发生相应变化,土壤具有同化和代谢外界进入土壤物质的能力,这种代谢与同化功能反过来会影响土壤理化性质[27]。

柯展鸿等人[28]研究发现,三裂叶蟛蜞菊入侵后土壤 pH 值显著降低,土壤养分含量显著提高。本试验中,羊柴入侵后,入侵地土壤 pH 值和电导率显著下降,提高了土壤碱解 N、有效 P 和速效 K 含量。沙鞭入侵后,入侵地土壤碱解 N 和有效 P 含量提高。从理论上讲,植物入侵并迅速扩展会消耗大量养分,但试验结果发现,克隆植物入侵能有效提高土壤中可利用营养物质含量。有研究[29]表明,入侵植物可以提高土壤微生物生物量,改变土壤酶活性,加强土壤养分循环,改善土壤微环境,提高土壤中植物可以吸收的养分含量。

3.3 DSE 与土壤因子的关系

相关性分析表明,克隆植物群落空地 DSE 定殖情况与土壤因子有显著相关性。羊柴群落空地 DSE 总定殖率与 pH 值和电导率显著正相关,羊柴入侵后入侵空地 pH 值和电导率显著降低,随着 pH 值逐渐偏向中性,土壤水溶性盐含量降低,使得土壤 DSE 种类发生变化,导致 DSE 定殖率下降,也可能是因为 pH 值和电导率的水溶性盐含量降低,DSE 和土壤间物质交换能力降低,使得 DSE 生长受阻所致。沙鞭群落空地 DSE 总定殖率与碱解 N 和有效 P 极显著正相关,随沙鞭入侵土壤碱解 N 和有效 P 含量显著升高,这些可利用的营养物质反过来有利于沙鞭生长和分株,促进了 DSE 生长和发育,使得样方空地 DSE 定殖率显著升高。

研究表明,不同根茎型克隆植物入侵对入侵群落空地 DSE 定殖情况和土壤理化性质产生不同影响。羊柴入侵,使入侵地 DSE 定殖率逐渐降低;沙鞭入侵,使入侵地 DSE 定殖率逐渐升高。两种克隆植物入侵,提高了入侵地土壤碱解 N 和有效 P 含量。因此克隆植物入侵对入侵地 DSE 和土壤养分的影响,创造了对自身生长有利的环境,这为克隆植物迅速扩展提供了前提。

与非克隆植物相比,依靠根茎繁殖的克隆植物通过根茎和分株向裸露斑块扩展,能迅速占据裸露斑块;根茎型克隆植物的基株占据很大空间,形成向数个方向延伸的由多个分株相连的植株,其防沙固沙效果更显著。从生态适应角度看,根茎克隆植物可显著提高逆境生态系统的自我恢复能力[5]。因此,大力开展荒漠区克隆植物种植,充分利用 DSE 真菌资源,促进克隆植物生长,进一步提高土壤中营养物质含量,从而有利于其它植物生长,为荒漠植被恢复提供依据。

参考文献(References):

[1] 董鸣, 于飞海. 克隆植物生态学术语和概念. 植物生态学报, 2007, 31(4): 689-694.

[2] 董鸣, 于飞海, 陈玉福, 宋明华, 刘建, 陈劲松, 李钧敏, 刘凤红. 克隆植物生态学. 北京: 科学出版社, 2011.

[3] 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.

[4] 付京晶, 周华坤, 赵新全, 陈哲, 温军, 姚步青, 杨元武, 金艳霞. 草原克隆植物对光、温、水、肥和牧压变化梯度的响应. 草业科学, 2013, 30(4): 616-626.

[5] 汤俊兵, 肖燕, 安树青. 根茎克隆植物生态学研究进展. 生态学报, 2010, 30(11): 3028-3036.

[6] 彭一可, 罗芳丽, 李红丽, 于飞海. 根状茎型植物扁秆荆三棱对土壤养分异质性尺度和对比度的生长响应. 植物生态学报, 2013, 37(4): 335-343.

[7] 杨磊. 克隆植物芦苇 AM 真菌多样性及时空分布研究[D]. 河北: 河北大学, 2006.

[8] 赵金莉, 贺学礼. 毛乌素沙地克隆植物生长对 AM 真菌多样性和菌根形成的影响. 生态学报, 2010, 30(5): 1349-1355.

[9] Mandyam K, Jumpponen A. Seeking the elusive function of the root-colonising dark septate endophytic fungi. Studies in Mycology, 2005, 53: 173-189.

[10] Regvar M, Likar M, Piltaver A, Kugonic N, Smith J E. Fungal community structure under goat willows (*Salix caprea* L.) growing at metal polluted site: the potential of screening in a model phytostabilisation study. Plant and Soil, 2010, 330(1/2): 345-356.

[11] Newsham K K. A meta-analysis of plant responses to dark septate root endophytes. New Phytologist, 2011, 190(3): 783-793.

[12] 戴莲, 李会娜, 蒋智林, 万方浩, 刘万学. 外来植物紫茎泽兰入侵对根际土壤有益功能细菌群、酶活性和肥力的影响. 生态环境学报, 2012, 21(2): 237-242.

[13] 刘法, 杨海龙, 高甲荣, 崔强, 李柏. 毛乌素沙地羊柴种群点格局分析. 中国水土保持科学, 2011, 9(4): 98-103.

[14] 袁继英. 固沙植物羊柴生态经济价值研究. 内蒙古草业, 2011, 23(3): 37-40.

[15] 叶学华, 董鸣. 毛乌素沙地克隆植物对风蚀坑的修复. 生态学报, 2011, 31(19): 5505-5511.

[16] 陈玉福, 于飞海, 张称意, 董鸣. 根茎禾草沙鞭的克隆生长在毛乌素沙地斑块动态中的作用. 生态学报, 2001, 21(11): 1745-1750.

[17] Bever J D, Morton J B, Antonovics J, Schultz P A. Host-dependent sporulation and species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in a mown grassland. The Journal of Ecology, 1996, 84(1): 71-82.

[18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

[19] Kormanik P P, Bryon W C, Schultz R C. Procedures and equipment for staining large numbers of plant root samples for endomycorrhizal assay. Canadian Journal of Microbiology, 1980, 26(4): 536-538.

[20] Biermann B, Linderman R G. Quantifying vesicular-arbuscular mycorrhizae: a proposed method towards standardization. New Phytologist, 1981, 87(1): 63-67.

[21] Hutchings M J, Wijesinghe D K. Performance of a clonal species in patchy environments: effects of environmental context on yield at local and whole-plant scales. Evolutionary Ecology, 2008, 22(3): 313-324.

[22] 陈玉福, 董鸣. 毛乌素沙地根茎灌木羊柴的基株特征和不同生境中的分株种群特征. 植物生态学报, 2000, 24(1): 40-45.

[23] Knapp D G, Pintye A, Kovacs G M. The dark side is not fastidious-dark septate endophytic fungi of native and invasive plants of semiarid sandy areas. Public Library of Science One, 2012, 7(2): 1-8.

[24] Wu L Q, Lv Y L, Meng Z X, Chen J, Guo S X. The promoting role of an isolate of dark-septate fungus on its host plant Saussurea involucrata Kar. et Kir. Mycorrhiza, 2010, 20(2): 127-135.

[25] Batten K M, Scow K M, Espeland E K. Soil microbial community associated with an invasive grass differentially impacts native plant performance. Microbial Ecology, 2008, 55(2): 220-228.

[26] 朱慧, 吴双桃. 杂草五爪金龙对入侵地植物群落和土壤肥力的影响. 生态与农村环境学报, 2012, 28(5): 505-510.

[27] 吴双桃. 薇甘菊对入侵地植物群落及土壤理化性质的影响. 湖北农业科学, 2011, 50(18): 3711-3713.

[28] 柯展鸿, 邱佩霞, 胡东雄, 朱慧, 宋莉英. 三裂叶蟛蜞菊入侵对土壤酶活性和理化性质的影响. 生态环境学报, 2013, 22(3): 432-436.

[29] 李钧敏, 钟章成, 董鸣. 田野菟丝子(*Cuscuta campestris*)寄生对薇甘菊(*Mikania micrantha*)入侵群落土壤微生物生物量和酶活性的影响. 生态学报, 2008, 28(2): 868-876.