

文章编号:2095-6134(2022)02-0185-08

# 高寒草原矮火绒草和紫花针茅微斑块对 $\text{Rb}^+$ 的吸收距离\*

孔倩, 牛海山†

(中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101408)  
(2020 年 4 月 8 日 收稿; 2020 年 6 月 28 日 收修改稿)

Kong Q, Niu H S. Potential absorption distance for  $\text{Rb}^+$  by *Stipa purpurea* and *Leontopodium nanum* in an alpine steppe[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2022, 39(2): 185-192. DOI: 10. 7523/j.ucas. 2020. 0039.

**摘 要** 植物微斑块是草原植被基本的空间分布形式, 空白裸地上的土壤养分资源在多远距离上能够被植物吸收是一个重要问题。利用稀有元素铷( $\text{Rb}$ )示踪方法, 通过分析  $\text{Rb}^+$  的吸收量和吸收距离, 探讨青藏高原高寒草原群落群落优势种紫花针茅(*Stipa purpurea*)和伴生种(同时也是退化草地常见种)矮火绒草(*Leontopodium nanum*)对土壤养分和水分资源的吸收范围。结果表明: 紫花针茅斑块对  $\text{Rb}^+$  的平均最大吸收距离(5.6 cm)约等于平均斑块间距(5.7 cm), 而矮火绒草斑块平均最大吸收距离(34.2 cm)远大于紫花针茅和平均斑块间距; 2 个物种对  $\text{Rb}^+$  的吸收量都与斑块大小(生物量)呈极显著正相关( $P < 0.001$ ); 无论吸收量还是吸收距离, 矮火绒草均大于紫花针茅。这说明裸地土壤中的养分资源可以被植物微斑块吸收利用, 而且大斑块对资源占有的能力也越强。

**关键词** 植物微斑块; 吸收距离;  $\text{Rb}^+$  示踪; 紫花针茅; 矮火绒草

**中图分类号:** Q948.1      **文献标志码:** A      **DOI:** 10. 7523/j.ucas. 2020. 0039

## Potential absorption distance for $\text{Rb}^+$ by *Stipa purpurea* and *Leontopodium nanum* in an alpine steppe

KONG Qian, NIU Haishan

(College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

**Abstract** Micro-patches are basic spatial units of steppe vegetation, which cause redistribution of soil nutrients during the formation and break of the patches. To what extent the resources in inter-patch bare ground could be utilized by plants is of an important issue to be answered. In this study, we injected rare elemental tracer  $\text{Rb}^+$  into the soil at different distances from the vegetation patch. By measuring the amount and distance of  $\text{Rb}^+$  being absorbed by vegetation micro-patches, we found that: 1) the average potential absorption distance of  $\text{Rb}^+$  by the dominant species *Stipa purpurea* is 5.6 cm, which almost equals the average interval of 5.7 cm among patches; 2) the average potential absorption distance by companion species *Leontopodium nanum* is 34.2 cm, which is much larger

\* 国家重点研发计划项目(2016YFC0501803)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA20050103)资助

† 通信作者, E-mail: niuhs@ucas.ac.cn

than that of *S. purpurea* and average interval among patches; 3) the total amount of  $Rb^{+}$  absorption is significantly positively correlated ( $P<0.001$ ) with the biomass/size of the micro-patches in both species. These results indicate that the nutrient resources in the bare soil are accessible to adjacent plant patches and that large patches have higher utilization potential and broader foraging area than small ones.

**Keywords**    vegetation    micro-patches;    absorption    distance;     $Rb^{+}$     tracer;    *Stipa purpurea*;    *Leontopodium nanum*

植物的斑块化分布是干旱半干旱地区植被最基本的空间分布形式,影响着草地生态系统的结构和功能。在大尺度上景观中的斑块往往相对稳定,而在小尺度下斑块则相对多变,因而自然植被大都在一定的时期内表现出总体稳定、局部变化的特点。草原植物群落的斑块格局与过程在小尺度上往往呈现出明显的不稳定性,并且随着草地利用方式的变化和利用程度的加剧,这种不稳定性更趋剧烈<sup>[1]</sup>。有研究<sup>[2-5]</sup>显示,在植物斑块的核心位置水分养分条件不如斑块的边缘,这种差异性进一步发展将形成环状植物斑块。例如,研究发现阿尔泰针茅斑块株丛就是从中心开始死亡,并逐渐向四周蔓延,造成原有斑块被分割为多个小斑块,最终导致大斑块完全破碎甚至逐步消失<sup>[6]</sup>。因此,从小尺度斑块入手对草地的总体特征进行综合研究非常重要<sup>[7]</sup>。草地微斑块是指被裸露地表间隔形成的大小在几厘米到几十厘米范围内的植物斑块,作为群落小尺度空间结构中最基本的单元,它的组成、性状和格局在一定程度上反映了草地的演替的阶段、驱动因素和发展趋势,对于认知和确定草地的退化和恢复程度具有重要的意义<sup>[8]</sup>。

对于小尺度植被空间格局的形成机制,有研究认为是由水分、养分的空间异质性导致的<sup>[9-10]</sup>,也有研究从植物斑块生境、斑块内的群落结构、草地放牧情况等影响因素方面寻求解释<sup>[11-15]</sup>,还有研究者关注斑块内种群的静态生命表、土壤种子库、植物竞争、植物-土壤反馈关系等生物过程的作用<sup>[10,16-18]</sup>。从结构性、有序性、非线性、开放性、非平衡性和涨落性这 6 个自组织特性<sup>[19]</sup>来看,高寒草原生态系统是一个自组织系统,而草地上大量存在的各种不同形状的植被斑块均是典型的空间自组织现象<sup>[20-22]</sup>。植被斑块的自组织是由各种微观过程的相互作用展现出的宏观有序性<sup>[23]</sup>。随着资源的增减变化,生态系统会经历一个可预测的自组织格局形成过程,即便是均

匀栽植的人工植被也会发生自组织过程,出现斑块化现象。

对植被斑块格局的形成,目前较普遍接受的是基于“距离依赖的正/负反馈”(scale-dependent feedbacks)的自组织理论<sup>[22,24]</sup>:在紧邻斑块的区域(内圈)主要表现为资源富集过程,即植物的存在与土壤营养状况之间存在正反馈关系;而在远离斑块的地方(外圈)主要为资源耗竭过程,植物斑块的存在与该处的土壤营养状况是负反馈关系;因此在内圈植物之间的互助作用(facilitation)和在外圈植物斑块之间的竞争作用(competition)都被强化,最终使得植物个体聚集成不连续的状态。也可以理解为,植物的存在开启并强化了土壤营养物质在空间上的分配过程,这反过来又促进了已有植物斑块中植物的生长。因此微斑块上的营养富集是以相邻裸地的资源耗竭为代价的,斑块之间的空白裸地其实是植物的资源“殖民地”。但是植物能从空白裸地多大范围内吸收营养?空白区中间是否存在不能被植物所利用的真“空白”?这些问题还缺乏实地的观测研究。

钾(K)是植物生长的重要养分元素,可表征植物可吸收利用的土壤范围;铷(Rb)在自然土壤中含量低且植物根系吸收养分时不区分钾和铷<sup>[25-27]</sup>, $Rb^{+}$ 和 $K^{+}$ 在离子半径、扩散系数和其他化学性质方面相似<sup>[28]</sup>,所以 $Rb^{+}$ 可以作为 $K^{+}$ 的替代元素示踪研究植物对 $K^{+}$ 及其他土壤资源的利用范围。紫花针茅(*Stipa purpurea*)是研究区植物群落的建群种<sup>[29]</sup>,它对土壤营养的吸收距离可能对斑块平均间距有影响。矮火绒草(*Leontopodium nanum*)是青藏高原草原生态系统常见物种之一,因为是直根系植物,可以预期它比丛生型须根系的紫花针茅具有更大的吸收距离,但迄今尚无实地测量的数据。此外矮火绒草常以不同大小的斑块形式存在于退化高寒草原中,在高寒草原植物群落演替中起着重要作用<sup>[11]</sup>,在放牧退化情况下,它的优势度上升。基于此,本研究选择紫花针

茅和矮火绒草为植物材料, 选取高寒草原的 3 处围封草地, 对植物微斑块进行养分元素的示踪实验, 探究: 1) 植物微斑块对土壤养分的吸收距离的阈值; 2) 不同大小、生境和物种的植物微斑块对土壤养分的吸收量或吸收距离的差异。

## 1 研究区概况

本研究的区域为中国西藏自治区那曲地区的班戈县, 该县地处西藏西北部, 那曲地区西部, 地理坐标范围为  $89^{\circ}00'00''\sim 91^{\circ}16'52''\text{ E}$ 、 $29^{\circ}56'38''\sim 32^{\circ}14'27''\text{ N}$ , 平均海拔在 4 700 m。班戈县为高

原亚寒带半干旱季风气候区, 气候寒冷, 空气稀薄, 四季不分明, 长冬无夏, 多风雪天气。年平均气温在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下, 年日照时数为 2 944.3 h 左右。年霜期 347.6 d, 没有绝对无霜期。7—8 月为雨季, 年降水量 308.3 mm。年平均冰雹日数在 30 d 以上。本研究选取的 3 个样地的高寒草原围栏围封年限不同, 基本信息如表 1 所示。围封年限为当地农牧局和牧民提供的大致年份, 经纬度和海拔数据为手持 GPS (GPSmap 60CSx, Garmin) 实地测量所得, 气温和降水来自青藏高原科学数据中心的“中国区域地面气象要素数据集<sup>[30]</sup>”。

表 1 研究地概况

Table 1 Research site overview

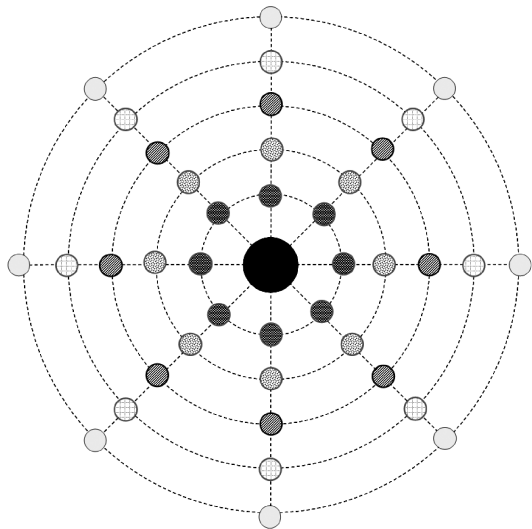
样地号	经度 E	纬度 N	海拔/m	围封年份	年均降水量/mm	年平均气温/ $^{\circ}\text{C}$
1	$89^{\circ}50'33.96''$	$31^{\circ}28'42.26''$	4 700	2013	326.5	-0.678
2	$90^{\circ}18'44.04''$	$31^{\circ}23'17.73''$	4 650	2008	370.0	0.005
3	$90^{\circ}41'36.20''$	$31^{\circ}22'50.76''$	4 650	2005	457.3	-0.070

## 2 研究方法

### 2.1 野外试验

用 Rb 进行元素示踪的方法为, 向 500 mL 蒸馏水中加入 1.51 g 固体氯化铷 (Macklin, R817218, GR), 溶解配制成  $0.025\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 RbCl 溶液, 用于示踪标记。在每个样地内随机选取物种为紫花针茅和矮火绒草的植物微斑块, 所选取的植物微斑块边缘的间距不小于 1 m, 分别对植物斑块边缘一定距离处的土壤进行标记物注射, 为减小空间异质性的影响, 同时在该斑块的东、南、西、北、东北、东南、西北、西南 8 个方向注射 (如图 1 所示), 自然生长的植物微斑块并非规则的圆形, 注射点与植物微斑块的距离为该注射点到斑块边缘的最短距离, 而非斑块的中心。本研究共设置了 5 个水平距离 (4、8、12、16 和 20 cm), 并设置 2 个注射深度 (5、10 cm), 每一点的每个深度分别注入 5 mL RbCl 溶液<sup>[22,31]</sup>。故影响本实验的标记包括 3 个样地、2 个物种、5 个水平距离和 2 个深度, 共 60 组处理; 与此同时, 对以上所有处理均设置注射 5 mL 不含 RbCl 的清水作为空白对照 (CK)。各处理重复 4 次, 在注射 24 h 后收获每个植物微斑块的整株植物。

为测量研究地点植物斑块的大小和间距, 在每个样地内各设置 3 条 20 m 长的样线, 用卷尺测量并统计被样线截得的斑块及裸地的个数和长度。



图中央黑色圆形表示植物微斑块, 从内向外依次为 5 个水平距离, 每个距离上共选择 8 个注射点

图 1 植物微斑块周边注射位点分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of injection points around a vegetation micro-patch

### 2.2 元素测量

将获取的植物根洗净,  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  杀青 3 h 后  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  烘干 24 h。将烘干的植物地上地下分开, 分别称取干重, 获得地上地下生物量, 用球磨仪 (GT100) 将其研磨成粉末状后备用。

采用微波消解-ICP-MS 法<sup>[2,32]</sup>测植物样品中  $\text{Rb}^+$  的含量。将标准物质及每个粉末状植物样品称取  $(0.1\pm 0.001)\text{ g}$  于消解管中, 加入 7 mL 浓硝酸 (西陇科学股份有限公司, GR) 和 3 mL 双氧水 (北京化学试剂研究所, BV-III), 用微波消解仪

(Mars 6,CEM)在 180 ℃ 恒温 30 min 模式下进行微波消解,消解完成后将消解液移至 50 mL 比色管中,定容至 25 mL。此时样品溶液酸度过高,故将溶液再次稀释 4 倍,过 0.22 μm 的滤膜备用。标准物质选用生物成分分析标准物质——菠菜(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,GBW10015 (GSB-6)),其回收率为 101% ~ 110%。用不同浓度的铷标准液(北京有色金属总院,GSB04-2836-2011)做标线,多次测试的标线  $R^2$  均大于 0.999。铯标准溶液 (Macklin, R817301) 作为内标,用 ICP-MS (ICAP Qc, Thermofisher) 测定样品中 Rb 元素的含量。

2.3 统计分析

所有数据均采用 R3.5.1 和 Excel 2016 软件进行统计分析和作图;用 Excel 2016 软件进行线性与非线性拟合;用 R3.5.1 进行曲线估计、方差分析、线性拟合、多重比较、区间估计。

3 结果与分析

3.1 斑块生物量对吸收量的影响

用地下、地上生物量之比表示每块样地矮火绒草和紫花针茅的根冠比。如图 2 所示,矮火绒草的根冠比显著高于紫花针茅。用整个斑块的地上、地下生物量之和表示植物斑块大小,在每个样地上 2 个物种的斑块生物量都与  $Rb^+$  的吸收量呈显著正相关关系(图 3),说明大的植物斑块吸收更多的土壤养分。从生物量的范围来看,各样地中 2 种植物微斑块的大小存在差异;从回归关系的斜率看,大小相同的植物斑块(相同生物量)的矮火绒草对  $Rb^+$  的吸收量大于紫花针茅。

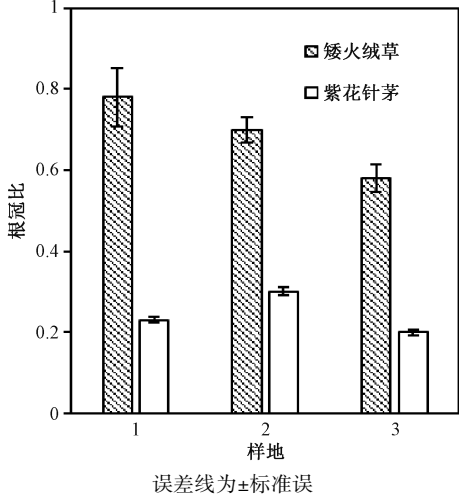


图 2 植物斑块的根冠比

Fig. 2 Root-shoot ratio of two species in the three sites

方差分析结果(表 2)显示植物斑块的  $Rb^+$  吸收量受生物量、地理因素和物种因素的影响显著,距离影响不显著。由于生物量对养分吸收量影响显著(图 3),可能会掩盖距离效应,所以用它作校正因子,对数据标准化后进行分析。

表 2  $Rb^+$ 吸收量的方差分析结果

影响因素	MS	F	P
斑块生物量	598 066	1 440. 409	<0.001
物种	242 616	584. 328	<0.001
样地	103 824	250. 055	<0.001
斑块生物量×物种	124 624	300. 151	<0.001
斑块生物量×样地	16 022	38. 589	<0.001
物种×样地	2 872	6. 917	0. 008

注:仅列出了  $P<0.05$  的影响因素。

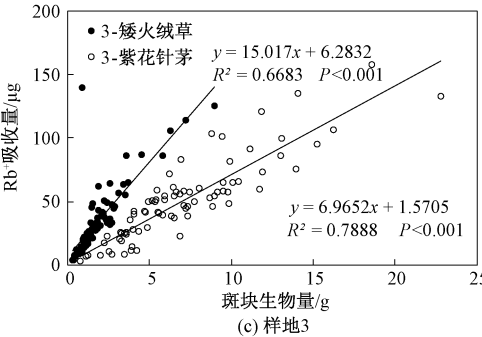
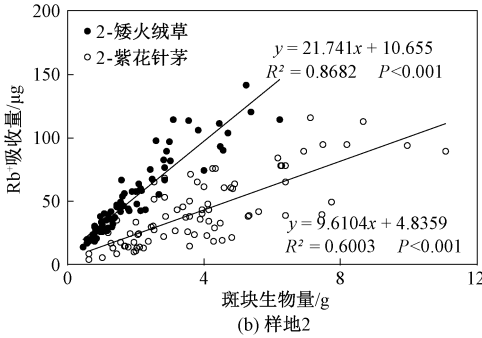
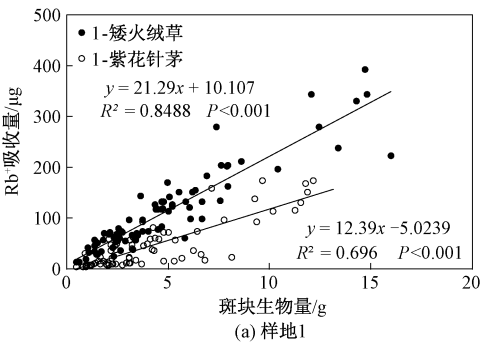


图 3 斑块生物量与  $Rb^+$  吸收量的关系

Fig. 3 The relationship between plant biomass in a patch and  $Rb^+$  absorption



3.2 物种和样地对吸收量的影响

用生物量将整个植物微斑块的 Rb<sup>+</sup>吸收量进行标准化,得到植物单位生物量的示踪元素吸收量(单位吸收量)。方差分析(表 3)结果显示,单位吸收量受水平距离、样地和物种因素的影响均达到  $P<0.001$  的显著水平,因素间的互作效应不显著,故将物种和样地分开作图(图 4)。矮火绒草的单位吸收量高于紫花针茅;在样地 1 矮火绒草植物斑块的单位吸收量随着距离由近到远呈现单峰的形态,而在样地 3 紫花针茅植物斑块的单位吸收量随着距离的增大而下降;在其他样地,其他物种均无明显的随距离而变化的趋势,且各距离间无显著差异。结合表 3 和图 4,说明矮火绒草的单位吸收量显著大于紫花针茅,不同样地间植物的单位吸收量差异显著。

表 3 单位吸收量的方差分析结果

Table 3 ANOVA results of unit biomass uptake of Rb <sup>+</sup>			
影响因素	MS	F	P
距离	406.9	11.360	<0.001
样地	1 546.5	43.180	<0.001
物种	23 568.6	658.080	<0.001

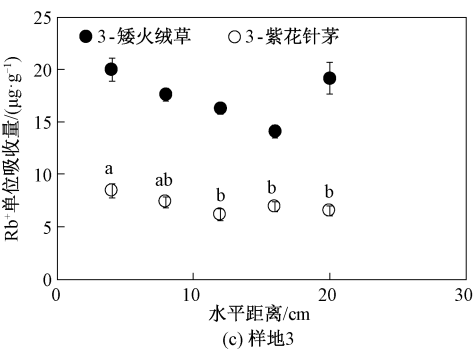
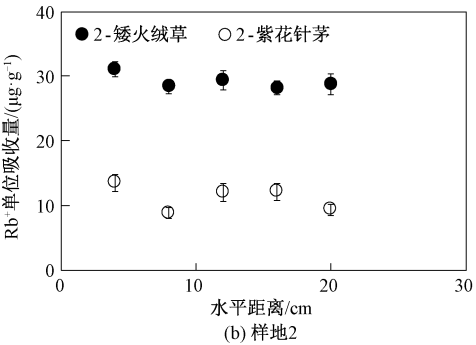
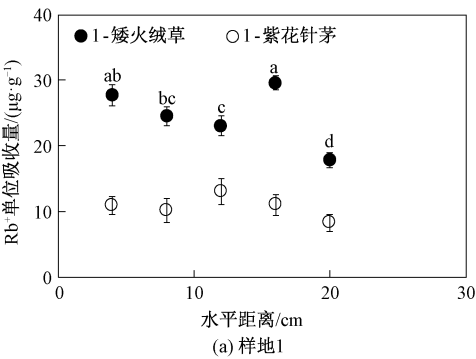
注:仅列出了  $P<0.05$  的影响因素。

3.3 物种和样地对吸收距离的影响

用生物量作校正因子,将距离标准化。曲线估计发现,斑块的 Rb<sup>+</sup>吸收总量与标准化距离的关系总体上满足  $y=78.66x^{-0.534}$ ,  $R^2=0.3638$ ,  $P<0.001$ ,呈幂函数曲线(图 5),说明总体而言,植物斑块对土壤养分的吸收量随距离增大而减小。

因为 Rb<sup>+</sup>吸收量与标准化距离的关系拟合结果(图 5)呈幂函数变化趋势,故将标准化的距离( $d$ )与斑块对 Rb<sup>+</sup>的吸收总量( $C$ )同时取对数可得线性关系。由于  $d$  接近于 0,故将其加 1( $D=d+1$ )再取对数,得出标准化距离的对数  $\ln D$  与吸收量的对数  $\ln C$  的关系直线(图 6),求出注射清水的对照(CK)与注射 RbCl 的处理(Tr)2 条直线的交点,其对应距离值即为植物斑块吸收 Rb<sup>+</sup>的临界距离。表 4 是协变量为  $\ln D$  的  $\ln C$  的协方差分析结果,样地和物种的影响作用显著,故分开作图(图 6)。图中显示,本研究总体上的 Tr 和 CK 的斜率有显著差异( $P=0.033$ ),而截距差异不显著( $P=0.623$ )。

植物斑块对 Rb<sup>+</sup>的吸收量随距离增加而减小,不同物种和样地的临界距离及其与斑块间平均距离的关系如表 5 所示。



误差线为±标准误;字母表示多重比较结果

图 4 各样地不同物种的 Rb<sup>+</sup>吸收量

Fig. 4 Absorption by different species at the three sites

表 4  $\ln C$  的协方差分析结果

Table 4 Covariance analysis results of $\ln C$			
因素变量	MS	F	P
样地	12.355	38.617 2	<0.001
物种	75.953	237.408 0	<0.001

注:协变量为  $\ln D$ ;仅列出  $P<0.05$  的影响因素。

表 5 Rb<sup>+</sup>吸收临界距离的估计值

Table 5 Estimated threshold of Rb <sup>+</sup> absorption distance				
	交点 ( $\ln D$ 值)	标准化距离/ ( $\text{cm} \cdot \text{g}^{-1}$ )	平均生 物量/g	斑块间平均 吸收临界距离 距离/cm 估计值/cm
总体	1.51	3.51	3.91	5.7 13.7
矮火绒草	2.31	9.06	3.78	— 34.2
紫花针茅	0.83	1.30	4.33	— 5.6
样地 1	1.08	1.95	4.60	6.2 9.0
样地 2	—	—	2.81	6.3 —
样地 3	1.72	4.56	4.31	4.5 19.7

注:表中“—”表示异常数据或无数据。

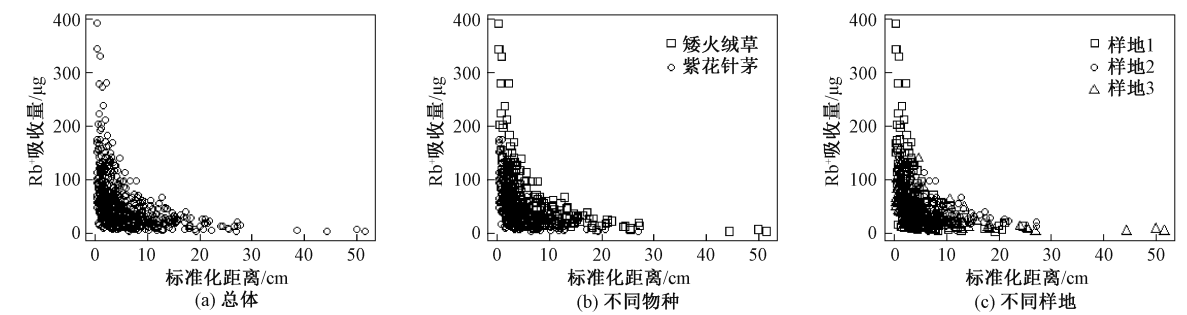
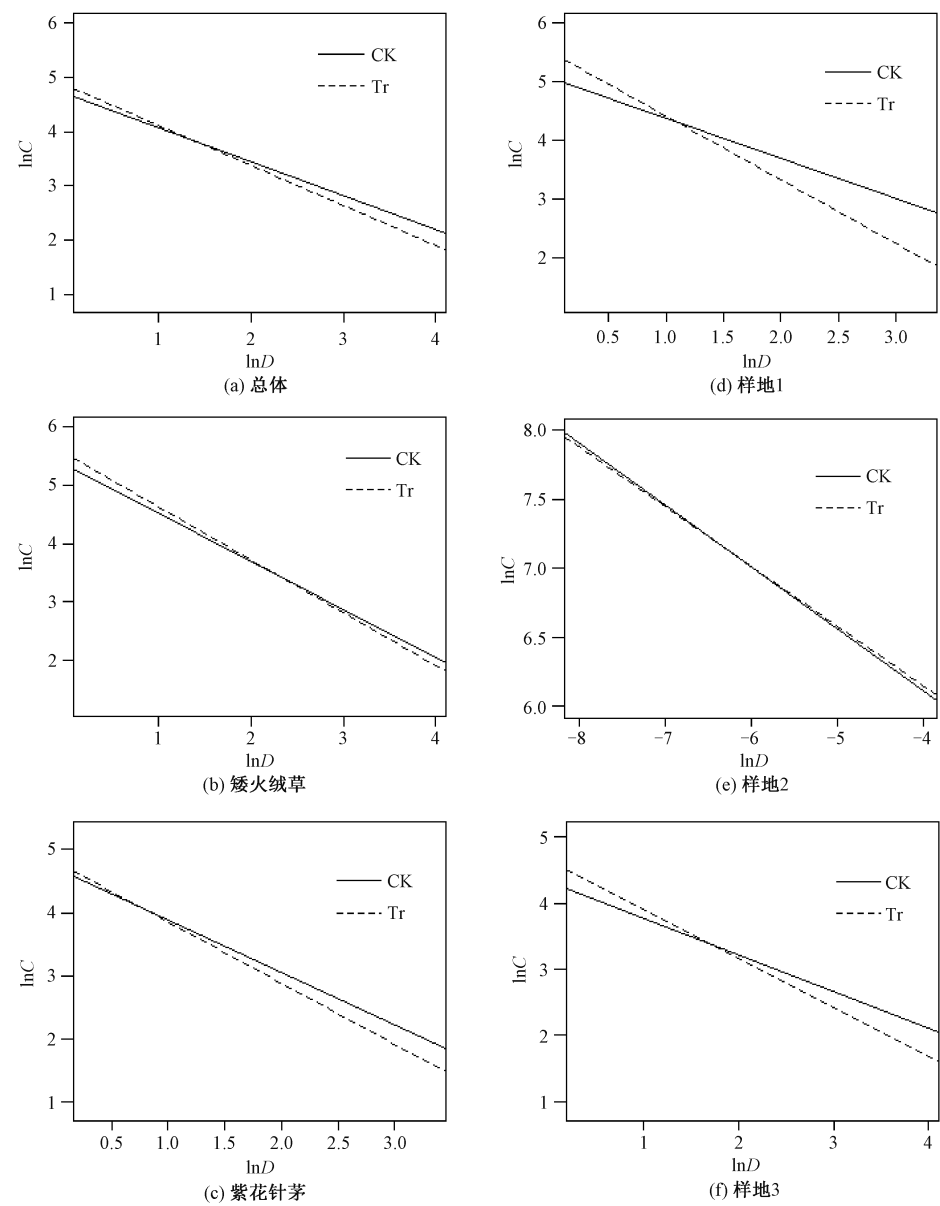


图 5 斑块的  $\text{Rb}^+$  吸收量与吸收距离的关系

Fig. 5 Relationship between  $\text{Rb}^+$  absorption amount and standardized distance



Tr 表示注射  $\text{RbCl}$  处理,CK 表示注射清水对照

图 6 斑块对  $\text{Rb}^+$  的吸收总量与标准化距离间的双对数关系

Fig. 6 Log-log plot of the relationship between  $\text{Rb}^+$  uptake amount and standardized distance

根据本研究所有样地和物种的  $\text{Rb}^+$  吸收量的对数  $\ln C$  与标准化距离的对数  $\ln D$  建立的相关关系,得到 2 条直线的交点后,对交点的  $\ln D$  进行置信度为 95% 的区间估计,其范围是 0.31~2.57,相

对应的标准化距离为 0.36~12.09 cm·g<sup>-1</sup>。

在本研究的 3 个样地中,植物微斑块吸收距离的临界值在 1.4~47.2 cm 范围内。结果说明,不同物种和不同生境条件下,植物微斑块的吸收距离存在差异。本研究区域内总体上植物斑块单位生物量的吸收距离临界值约为 3.51 cm·g<sup>-1</sup>,根据斑块大小(生物量)得出吸收临界值约为 13.7 cm,通过对比植物斑块间的距离 5.7 cm,说明本研究区域相邻植物斑块会竞争裸地土壤中的养分资源。

## 4 讨论

若植物斑块对土壤养分的吸收距离小于斑块间的裸地距离,就说明裸地土壤中有剩余资源未被利用。而本研究区域内,Rb<sup>+</sup>吸收距离大于斑块间裸地的平均宽度(表 5),说明裸地土壤中的养分将会被其周围的植物斑块竞争吸收,甚至有可能一个植物斑块的养分会被邻近的植物斑块竞争。裸地的养分含量通常低于植物斑块所在的土壤,而竞争作用会抑制植物斑块从远处的土壤中吸收养分,形成植物-土壤负反馈关系,可能加剧植被斑块的破碎化。

本研究中选择紫花针茅和矮火绒草在单位生物量的养分吸收量和吸收距离上都表现出明显的差异。这 2 种植物都是研究区内的优势物种,由于矮火绒草的根冠比远大于紫花针茅(图 2),因此在总生物量相当时矮火绒草的根量也更大,使得它能够占据并利用更大的土壤空间。在半干旱区,植物斑块和裸地的土壤养分含量相差很明显<sup>[10]</sup>,植物会通过可塑性反应来应对土壤养分的时空异质性<sup>[33]</sup>,当根系遇到营养丰富的斑块时通常会增殖,在提高根的数量时往往也能增强其养分吸收的生理能力,矮火绒草可能在这方面强于紫花针茅,使得它的单位生物量的吸收量和吸收临界距离均高于紫花针茅(图 4、表 5)。生物量大的植物微斑块根系也较大,因而有较高的吸收量(图 3)。3 个样地间的同种植物也存在差异,表明生境对植物微斑块吸收养分有着显著的影响(表 3、表 4),很多研究<sup>[34-36]</sup>表明围栏能很好地改善草原植被的生长状况,围封年限(表 1)的不同可能是导致样地间植物吸收距离差异(表 5)的原因之一。

根据本文的研究结果,随着草地的退化,裸地土壤的养分有效性降低,促使周边的植物微斑块

的生物量下降,根系生物量和其可利用的土壤范围减小,吸收距离变短,这将造成植物斑块内部竞争加剧。由于植物斑块的中心受到斑块边缘植物的共同作用,强烈的竞争导致植物斑块中心土壤养分严重亏缺,进而引起植物死亡,斑块从中心崩溃,形成环状分布的小斑块<sup>[6,18]</sup>,使植被盖度和生物量减少。本研究明确了高寒草原植物微斑块吸收周边裸地土壤养分的潜在距离,为自组织理论在植物营养吸收空间关系方面的应用提供了实测数据支持。

## 5 结论

1) 在本研究的高寒草原,植物微斑块对土壤中 Rb<sup>+</sup>的吸收距离大于斑块间裸地的平均宽度,邻近的植物斑块会竞争吸收周边裸地土壤中的养分资源,竞争作用抑制植物向外扩张、促进植物聚集,有利于植物斑块形成;

2) 植物微斑块对 Rb<sup>+</sup>的吸收量与斑块大小(生物量)正相关;无论是吸收量还是吸收距离,矮火绒草均大于紫花针茅,表明植物斑块的大小和物种影响植物微斑块对土壤养分的吸收量和吸收距离。

## 参考文献

- [1] 张卫国,黄文冰,杨振宇. 草地微斑块与草地退化关系的研究[J]. 草业学报, 2003, 12(3): 44-50. DOI: 10.3321/j.issn:1004-5759.2003.03.007.
- [2] Carteni F, Marasco A, Bonanomi G, et al. Negative plant soil feedback explaining ring formation in clonal plants[J]. Journal of Theoretical Biology, 2012, 313: 153-161. DOI: 10.1016/j.jubi.2012.08.008.
- [3] 韩立辉,尚占环,任国华,等. 青藏高原“黑土滩”退化草地植物和土壤对秃斑面积变化的响应[J]. 草业学报, 2011, 20(1): 1-6.
- [4] 赵成章,高福元,石福习,等. 高寒退化草地甘肃臭草种群分布格局及其对土壤水分的响应[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6688-6695.
- [5] 赵玉晶,白云鹏,韩大勇,等. 松嫩平原环境破碎化后羊草斑块植物组成多样性的空间变化[J]. 草地学报, 2008, 16(2): 158-163. DOI: 10.3969/j.issn.1007-0435.2008.02.012.
- [6] 赵成章,任珩,盛亚萍,等. 不同高寒退化草地阿尔泰针茅种群的小尺度点格局[J]. 生态学报, 2011, 31(21): 6388-6395.
- [7] 石明明,张永超,张典业,等. 高寒草甸草地微斑块植物特征及其土壤性质的研究[J]. 草业学报, 2015, 24(9): 197-205. DOI: 10.11686/cyxb2015083.
- [8] Crain C, Koppal J. Scale-dependent inhibition drives regular

tussock spacing in a freshwater marsh [J]. The American Naturalist, 2006, 168 ( 5 ): E136-E147. DOI: 10. 1086/508671.

[ 9 ] 白永飞,许志信,李德新. 内蒙古高原紫花针茅草原群落土壤水分和碳氮分布的小尺度空间异质性[J]. 生态学报, 2002, 22( 8 ): 1215-1223. DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-0933. 2002. 08. 007.

[ 10 ] 乌云娜,雒文涛,霍光伟,等. 草原群落退化演替过程中微斑块土壤碳氮的空间异质动态[J]. 生态学报, 2014, 34( 19 ): 5549-5557. DOI: 10. 5846/stxb201301090067.

[ 11 ] 牟晓明,于应文,王先之,等. 青藏高原原火绒草斑块群落空间格局分析[J]. 生态学报, 2015, 35( 16 ): 5306-5315. DOI: 10. 5846/stxb2014190770.

[ 12 ] 彭海英,李小雁,童绍玉. 内蒙古典型草原小叶锦鸡儿灌丛化对水分再分配和利用的影响[J]. 生态学报, 2014, 34( 9 ): 2256-2265. DOI: 10. 5846/stxb201306051359.

[ 13 ] 廖亚鑫,胡广录,樊立娟,等. 黑河中游荒漠-绿洲过渡带斑块状植被区土壤水分变异特征分析[J]. 兰州交通大学学报, 2015, 34( 3 ): 159-165, 170. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-4373. 2015. 03. 030.

[ 14 ] 苏永中,常学向,何志斌,等. 祁连山典型流域谷地植被斑块演变与土壤性状[J]. 生态学报, 2008, 28( 1 ): 212-219. DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-0933. 2008. 01. 024.

[ 15 ] 乌云娜,雒文涛,霍光伟,等. 微生境尺度上放牧退化草原群落特征与土壤有机质的空间分异性[J]. 中国沙漠, 2012, 32( 4 ): 972-979.

[ 16 ] 郝红敏,路荣,贾超,等. 水蚀风蚀交错带黑沙蒿灌丛斑块种群结构及动态特征研究[J]. 西北植物学报, 2017, 37( 4 ): 773-781. DOI: 10. 7606/j. issn. 1000-4025. 2017. 04. 0773.

[ 17 ] 李彦娇,包维楷,周志琼,等. 岷江干旱河谷不同植物斑块的土壤种子库特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24( 4 ): 602-609. DOI: 10. 16258/j. enki. 1674-5906. 2015. 04. 009.

[ 18 ] 高福元,赵成章,卓马兰草. 高寒退化草地不同海拔梯度狼毒种群分布格局及空间关联性[J]. 生态学报, 2014, 34( 3 ): 605-612. DOI: 10. 5846/stxb201209191317.

[ 19 ] 蒋建生,任继周,蒋文兰. 草地农业生态系统的自组织特性[J]. 草业学报, 2002, 11( 2 ): 1-6. DOI: 10. 3321/j. issn: 1004-5759. 2002. 02. 001.

[ 20 ] Klausmeier C A. Regular and irregular patterns in semiarid vegetation [J]. Science, 1999, 284 ( 5421 ): 1826-1828. DOI: 10. 1126/science. 284. 5421. 1826.

[ 21 ] Rietkerk M, Boerlijst M C, Van Langevelde F, et al. Self-organization of vegetation in arid ecosystems [J]. The American Naturalist, 2002, 160 ( 4 ): 524-530. DOI: 10. 1086/342078.

[ 22 ] Rietkerk M, van de Koppel J. Regular pattern formation in real ecosystems [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2008, 23( 3 ): 169-175. DOI: 10. 1016/j. tree. 2007. 10. 013.

[ 23 ] 张化永,邬建国,韩兴国. 植被的组织有序度及其全球格局[J]. 植物生态学报, 2002, 26( 2 ): 129-139.

[ 24 ] 赵文智,郑颖,张格非. 绿洲边缘人工固沙植被自组织过程[J]. 中国沙漠, 2018, 38( 1 ): 1-7. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-694X. 2017. 00091.

[ 25 ] Jones H E, Harrison A F, Dighton J. A <sup>86</sup>Rb bioassay to determine the potassium status of trees [J]. New Phytologist, 1987, 107( 4 ): 695-708. DOI: 10. 1111/j. 1469-8137. 1987. tb00907. x.

[ 26 ] Kuhlmann H, Claassen N, Wehrmann J. A method for determining the K-uptake from subsoil by plants [J]. Plant and Soil, 1985, 83 ( 3 ): 449-452. DOI: 10. 1007/BF02184456.

[ 27 ] Gockele A, Weigelt A, Gessler A, et al. Quantifying resource use complementarity in grassland species: a comparison of different nutrient tracers [J]. Pedobiologia, 2014, 57( 4-6 ): 251-256. DOI: 10. 1016/j. pedobi. 2014. 09. 001.

[ 28 ] Reickenberg R L, Pritts M P. Dynamics of nutrient uptake from foliar fertilizers in red raspberry (*Rubus idaeus* L.) [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1996, 121( 1 ): 158-163. DOI: 10. 21273/jashs. 121. 1. 158.

[ 29 ] 李新娥,孟凡栋,姜丽丽,等. 藏北高原自东向西样带典型植物群落中矮蒿草与紫花针茅小尺度空间格局变化[J]. 生态学杂志, 2019, 38( 9 ): 2577-2584. DOI: 10. 13292/j. 1000-4890. 201909. 007.

[ 30 ] Yang K, He J, Tang W J, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150 ( 1 ): 38-46. DOI: 10. 1016/j. agrformet. 2009. 08. 004.

[ 31 ] Jiang Z Y, Li X Y, Wei J Q, et al. Contrasting surface soil hydrology regulated by biological and physical soil crusts for patchy grass in the high-altitude alpine steppe ecosystem [J]. Geoderma, 2018, 326: 201-209. DOI: 10. 1016/j. geoderma. 2018. 04. 009.

[ 32 ] 杜鹏飞. 茶叶中铅的检测方法研究 [D]. 四川泸州: 泸州医学院, 2014.

[ 33 ] Hodge A. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients [J]. New Phytologist, 2004, 162( 1 ): 9-24. DOI: 10. 1111/j. 1469-8137. 2004. 01015. x.

[ 34 ] He N, Yu Q, Wu L, et al. Carbon and nitrogen store and storage potential as affected by land-use in a *Leymus chinensis* grassland of Northern China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40( 12 ): 2952-2959. DOI: 10. 1016/j. soilbio. 2008. 08. 018.

[ 35 ] Wang S, Wilkes A, Zhang Z, et al. Management and land use change effects on soil carbon in Northern China's grasslands: a synthesis [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 142( 3/4 ): 329-340. DOI: 10. 1016/j. agee. 2011. 06. 002.

[ 36 ] Wu G L, Du G Z, Liu Z H. et al. Effect of fencing and grazing on a *Kobresia*-dominated meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Plant and Soil, 2009, 319( 1/2 ): 115-126. DOI: 10. 1007/s11104-008-9854-3.