

内蒙古半干旱草原灌丛化过程中小叶锦鸡儿引起的土壤碳、氮资源空间异质性分布

熊小刚^{1,2}, 韩兴国^{1*}

(1. 中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 过度放牧下内蒙古半干旱草原, 由于小叶锦鸡儿多度增加导致植被灌丛化, 这已经成为该地草原退化时的普遍现象。草原灌丛化过程中, 灌丛内凋落物的累积使得养分循环区域化, 草原土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(STN)空间异质性增强, 导致灌丛沃岛形成。半干旱草原灌丛化过程机制的假说认为: 灌丛斑块扩展与其引起的土壤空间异质性的增强之间存在着正反馈作用, 正是这种反馈作用促使草地向灌丛地的转变。小叶锦鸡儿通过克隆生长形成不同大小的斑块, 它们对应于其发育的不同阶段。因此, 将不同大小的灌丛沃岛划分为小灌丛组与大灌丛组, 它们代表着灌丛沃岛发育的早期与晚期两个阶段。

结果表明: 内蒙古半干旱草原灌丛化过程中, 小叶锦鸡儿灌丛斑块引起了土壤有机碳(SOC)与土壤全氮(STN)的空间异质性, 表现在水平方向上, 对于 0~5cm, 5~10cm, 10~20cm 3 个土壤层次, 由灌丛斑块内部向外部 SOC 与 STN 均趋于降低; 而在垂直方向上, 对于灌丛斑块内部、边缘和外部 3 个位置, 由 0~10cm 到 10~20cm 再到 20~30cm, 随着土壤深度增加 SOC 与 STN 均趋于降低。随着小叶锦鸡儿灌丛斑块扩展, SOC 与 STN 空间异质性的分布不断增强, 表现在灌丛斑块内部相对于外部(或边缘)对 SOC 与 STN 富集程度均显著增加。草原灌丛化过程 SOC 与 STN 空间异质性变化在 0~5cm, 5~10cm, 10~20cm 3 个土壤层次中, 以表层 0~5cm 的表现最为强烈。表层 0~5cm 土壤空间异质性的形成与灌丛自身凋落物的生产以及对灌丛外凋落物的截留有关。由此推断: 退化草原灌丛化的过程中, 小叶锦鸡儿灌丛斑块引起 SOC 与 STN 空间异质性的变化是一个自我增强过程, 灌丛斑块扩展与其导致的 SOC 与 STN 空间异质性增强之间存在着正反馈作用。因此, 以上关于半干旱草原灌丛化机制的假说对我国内蒙古半干旱草原灌丛化也是适用的。

关键词: 内蒙古; 半干旱草原; 小叶锦鸡儿; 灌丛化; 空间异质性; 土壤有机碳(SOC); 土壤全氮(STN)

文章编号: 1000-0933(2005)07-1678-06 **中图分类号:** Q948, S812 **文献标识码:** A

Spatial heterogeneity in soil carbon and nitrogen resources, caused by *Caragana microphylla*, in the thicketization of semiarid grassland, Inner Mongolia

XIONG Xiao-Gang^{1,2}, HAN Xing-Guo^{1*} (1. Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (7): 1678~1683.

Abstract: Thicketization of vegetation for the increased abundance of shrub, *Caragana microphylla*, has been widespread under overgrazing in the semiarid grassland, Inner Mongolia. During this process, the cycling of nutrients is progressively confined to the zones of litter accumulation beneath shrub, and spatial heterogeneity of soil organic carbon (SOC) and soil total nitrogen (STN) tends to increase, and results in the formation of the islands of fertility. It is hypothesized that there is the positive feedback between the increase in spatial heterogeneity of SOC and STN and the shrub expansion, which promotes the transition from grassland to shrubland. At our study site, *Caragana Microphylla* could expand through the clonal growth and form a

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000018603)

收稿日期: 2004-08-01; **修订日期:** 2005-04-13

作者简介: 熊小刚(1968~), 男, 甘肃天水人, 博士生, 助理研究员, 主要从事草原恢复生态学研究。E-mail: xiong-cai@sohu.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xghan@ibcas.ac.cn

Foundation item: the State Basic Research and Development Plan (G2000018603)

Received date: 2004-08-01; **Accepted date:** 2005-04-13

Biography: XIONG Xiao-Gang, Ph. D. candidate, Assistant professor, mainly engaged in grassland restoration ecology. E-mail: xiong-cai@sohu.com

patch with different size. Shrub patches with the different class of size could be viewed as distinct stages of shrub development. Therefore, different size classes of shrubs (“small”, and “large”) represented corresponding stages of fertile island development (i. e., “early” and “late” respectively).

Results showed that shrub patches, formed by *Caragana microphylla*, could induce spatial heterogeneity of SOC and STN during the thicketization of semiarid grassland, Inner Mongolia. For all of 0~5cm, 5~10cm, 10~20cm soil depths, along the horizontal direction from the inside to the edge and to the outside of shrubs, SOC and STN tended to decrease. For all of the inside, edge and outside of shrub patches, along the vertical direction from 0~5cm to 5~10cm and to 10~20cm soil depth, SOC and STN tended to decrease. Spatial heterogeneity of SOC and STN enhanced increasingly as a shrub patch expanded, expressed by SOC and STN accretion, for the inside relative to the edge (or the outside), it increased significantly in the three soil depths. Spatial heterogeneity of SOC and STN in the surficial 0~5cm soil depth changed most significantly among three soil depths, which was associated with the production of litter under shrub patches and the interception of litter from out-shrub areas.

It was concluded that spatial heterogeneity in SOC and STN, induced by *Caragana microphylla*, was self-reinforced, and there was the positive feedback between the increase of spatial heterogeneity in SOC and STN and the expansion of shrub patches. Therefore, the above hypothesis was appropriate to the thicketization of the semiarid grassland, Inner Mongolia.

Key words: Inner Mongolia; semiarid grassland; *Caragana microphylla*; thicketization; spatial heterogeneity; soil organic carbon (SOC); soil total nitrogen (STN)

过度放牧下干旱与半干旱区(drylands)草原荒漠化过程中,木本灌木植物多度(abundance)增加导致草原的灌丛化(thicketization),这已经成为该地带普遍发生的现象^[1]。在我国草原生态学研究,对于内蒙古半干旱草原灌丛化已经受到关注^[2,3]。锡林河流域位于内蒙古草原中东部,其主体部分属于半干旱草原。小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)是草原旱生灌木,它极其广泛地散生于半干旱草原中。近 20a 的过度放牧,草原植被退化过程中,小叶锦鸡儿分布密度和盖度的增加,导致该地草原灌丛化的普遍出现^[4]。在草原中定居的灌木植物,能够通过对土壤资源的吸收和沉积^[5~8],将有机物质集中于其冠层下土壤中,对养分的空间分布和循环产生影响^[9~11],使土壤资源异质性增强,从而导致灌丛沃岛的形成(fertile island effects)^[12~14]。灌木在草原中的扩展与其冠层下土壤异质性增强之间存在着正反馈作用^[14~17]。这种正反馈作用增强了灌木对环境扰动的抵抗能力,以及它在灌丛化草原生态系统中更持久的生存和维持^[14,15,17,18],并决定了灌木植物种占优势的生态系统稳定态的存在^[19,20]。因此,对于草原灌丛化过程中,小叶锦鸡儿灌丛斑块发育引起的土壤异质性的变化,是揭示草原灌丛化机制的切入点^[21]。

该研究借鉴对灌丛沃岛研究的时空替代方法^[18,22],即将所有调查的灌丛斑块分为小灌丛组与大灌丛组,它们分别对应着灌丛斑块及其沃岛发育的早期和晚期两个阶段。回答以下两个问题:一是在退化的内蒙古半干旱草原中,小叶锦鸡儿灌丛斑块引起的土壤有机碳与全氮含量空间异质性,在其水平方向与垂直方向的表现特征?二是该地草原灌丛化过程中,灌丛斑块自身的扩展与其引起的土壤异质性增强之间的关系?目的是说明小叶锦鸡儿灌丛斑块对于土壤空间异质性的影响状况,探讨草原灌丛化过程中,灌丛斑块发育与其引起的土壤异质性增强之间的内在关系。

1 研究地点与方法

1.1 研究地点概况

锡林河流域位于内蒙古高原的中东部,该地气候类型为温带半干旱大陆性季风气候,多年均降水量为 350.43mm,主要集中在 7~9 月份,降水量的年际变化较大;在最冷月(1 月份)均温为 -21.41℃,最热月(7 月份)均温为 18.51℃。无霜期从每年的 5 月初到 9 月初,大约 120d。锡林河流域原生草原植被的主体是以羊草和大针茅为优势种的典型草原。由于 20a 来的过度放牧,草原植被退化总体上十分严重,伴随着牧场荒漠化过程,典型草原中的旱生灌木小叶锦鸡儿分布密度和盖度的增加,导致退化草原灌丛化的普遍发生,目前在该流域灌丛化草原已经有大面积地分布。

1.2 研究方法

1.2.1 研究样地选取 于 2003 年 8 月中旬,将研究地点位于中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站羊草样地西北,相距约 1.5km 的丘陵缓坡上,海拔范围在 1150~1200m。土壤类型为典型栗钙土,原生植被类型为以羊草和大针茅为优势种的典型草原,由于过度放牧导致草原灌丛化,小叶锦鸡儿灌丛以斑块状存在,呈岛屿状散布于退化草原构成的背景上。在坡度平缓地带建立 120m×100m 的研究样地,将其划分为 20m×20m 的网格,在每个网格中选取小叶锦鸡儿灌丛斑块 1 丛,共选取小叶锦鸡儿灌丛斑块 30 丛。

1.2.2 灌丛斑块选取与小、大灌丛组的划分标准 灌丛斑块选取的标准如下:(1)外形较规则、生长较均匀一致,以尽可能减少同等大小灌丛斑块间生长状况的差异;(2)灌丛斑块内部与相邻灌丛斑块内部之间的距离不小于两灌丛长、短径平均值之和,以尽可能减少相邻灌丛斑块之间的影响。由于实验地点小叶锦鸡儿也受到羊群啃食,其灌层顶部较为齐整,高度变化较小。因此将小叶锦鸡儿灌丛斑块大小按照其垂直投影的面积计算,其投影大体看作为椭圆形,测定其长轴与短轴以计算大小。灌丛斑块发育主要是借助克隆生长的水平扩展实现的,因此灌丛斑块的大小与灌丛斑块发育时间相对应。将所有调查的灌丛斑块分为小、大两个组,每组 15 丛,对应于灌丛斑块发育及灌丛沃岛的早期与晚期两个阶段。

1.2.3 灌丛斑块内部、边缘与外部土壤取样与测定 针对每一灌丛斑块的土壤取样位置分内部、边缘与外围共 3 个位置,分为 0~5cm,5~10cm,10~20cm 共 3 个取样层次。灌丛斑块内部取样点位于灌丛投影椭圆的长轴与短轴上,在其内部附近,大约离开中心长、短轴四分之一的距离处;对应的灌丛斑块边缘取样点也位于长轴与短轴上,位于其垂直投影的边缘,相对应的灌丛斑块外围取样点位置在长短轴方向离开灌丛斑块边缘约为长、短轴四分之一的距离处。土壤取样采用内径 20mm 的土钻,灌丛斑块同一位置同一层次的土壤测定用 4 个地点的混合样。土壤样品荫凉处自然晾干,去除死根、枯落物与小块砾石,研钵研磨后过 80 目土壤筛。土壤有机质含量(以下简称 SOC)测定采用重铬酸钾容量-外加热法,土壤全氮含量(以下简称 STN)测定采用 Kjeldahl 定氮法。以上过程均在中国科学院内蒙古草原生态系统定位站实验室进行。

1.2.4 灌丛斑块内外植被地上生物量测定 在每一灌丛斑块内外设立成对的 0.5m×0.5m 的样方,将地上生物量分为现存量与凋落物两部分,采用收获法。灌木和草本植物地上现存量用剪刀齐地面剪去后,地表凋落物用铁梳刮取,将其中泥沙去除。现存量与凋落物量于烘箱 65℃烘干 48h 至恒重后,用 0.01g 天平称重。

1.3 数据分析

采用 SPSS11.5 进行统计分析,均值显著性检验均采用一维方差分析(ANOVA)。

2 结果

2.1 灌丛化草原灌丛斑块内外植被概况

依据灌丛斑块内外植被 0.5m×0.5m 样方调查结果:灌丛内部共出现植物 32 种,灌丛外部出现 34 种,灌丛内外草本植被的主要草本植物种类相同,最常见植物种有羊草(*Leymus chinense*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、大针茅(*Stipa grandis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、寸草苔(*Carex duriuscula*)等。灌丛内草本植物植被高度约在 20~30cm,普遍高于灌丛外退化草地草本植被高度,约为 15~20cm。灌丛斑块植被的盖度在 80%~90%,而灌丛外在 60%~70%。

研究地点灌丛化草原中小叶锦鸡儿一般以斑块形式存在。小叶锦鸡儿灌丛高度约在 40~55cm。将 30 丛灌丛斑块等分为大、小两个灌丛组,每组 15 丛,其平均大小分别为 2.28±0.84m²、5.68±1.56m²,灌丛斑块组间大小均值差异显著($p<0.01$)。

2.2 灌丛斑块内部、边缘与外部土壤碳、氮资源空间异质性的静态分析

2.2.1 灌丛斑块内部、边缘与外部 SOC 空间分布 无论对于小灌丛组还是大灌丛组,即在灌丛斑块发育的早期与晚期,其内部、边缘与外部 SOC 空间分布的共同特征是:沿灌丛内部到边缘再到外部水平方向,对于 0~5cm,5~10cm,10~20cm 3 个土壤层次,SOC 含量均呈现显著下降趋势($p<0.01$)。从土壤表层 0~5cm 到 5~10cm 再到 10~20cm 垂直方向,对于灌丛斑块内部、边缘与外部 3 个位置,SOC 含量均呈显著下降的趋势($p<0.01$)(表 1)。这表明在小叶锦鸡儿灌丛斑块发育的早期与晚期,它的存在均显著增强了退化草原中 SOC 的空间异质性。

表 1 灌丛斑块内部、边缘与外部的 SOC 含量(mg/g)

Table 1 SOC of in-shrub, edge-shrub and out-shrub

土壤层次 Soil layer(cm)	小灌丛组 Small group			大灌丛组 Large group		
	内部 Inside	边缘 Edge	外部 Outside	内部 Inside	边缘 Edge	外部 Outside
0~5	29.24±2.79	24.96±2.92	22.03±1.78	32.90±2.88	25.20±4.47	19.34±1.62
5~10	22.80±3.13	18.99±2.25	14.81±1.22	25.77±3.56	17.84±1.99	15.33±2.20
10~20	15.17±1.22	14.24±1.47	10.88±0.99	14.59±1.44	15.13±3.37	10.20±0.92

2.2.2 灌丛斑块内部、边缘与外部 STN 的空间分布 无论对于小灌丛组还是大灌丛组,即在灌丛斑块发育的早期与晚期,其内部、边缘与外部 STN 空间分布的共同特征是:沿灌丛内部到边缘再到外部水平方向,对于 0~5cm、5~10cm、10~20cm 3 个土壤层次,STN 含量均呈现显著下降趋势($p<0.01$)。从土壤表层 0~5cm 到 5~10cm 再到 10~20cm 垂直方向,对于灌丛斑块内部、边缘与外部 3 个位置,STN 含量呈显著下降的趋势($p<0.05$)(表 2)。这表明:在小叶锦鸡儿灌丛斑块发育的早期与晚期,它的存在均显著增强了退化草原中 STN 的空间异质性。

总之,在小叶锦鸡儿灌丛斑块发育的早期与晚期,无论对于 SOC 与 STN,在其内部、边缘与外部 0~5cm、5~10cm、10~20cm 3 个土壤层次中的分布状况均表明:小叶锦鸡儿灌丛斑块的存在显著增强了退化草原土壤资源的空间异质性,表现在水

平方向由中心向外不断递减,在垂直方向上,由随着土壤深度增加而递减,并且在统计上均达到显著程度。

表 2 灌丛斑块内部、边缘与外部 STN 含量(mg/g)
Table 2 STN of in-shrub, edge-shrub and out-shrub

土壤层次 Soil layer(cm)	小灌丛组 Small group			大灌丛组 Large group		
	内部 Inside	边缘 Edge	外部 Outside	内部 Inside	边缘 Edge	外部 Outside
0~5	2.82±0.39	2.38±0.25	2.12±0.19	3.12±0.41	2.44±0.38	1.84±0.16
5~10	2.08±0.21	1.74±0.23	1.52±0.13	2.15±0.30	1.75±0.24	1.42±0.18
10~20	1.60±0.14	1.35±0.17	1.15±0.10	1.59±0.19	1.27±0.12	1.09±0.10

2.3 灌丛斑块内部、边缘与外部土壤碳、氮资源空间异质性的动态分析

大小灌丛组间同一位置同一土壤层次间的大小差异的变化,能够反映随着灌丛斑块发育,土壤资源空间异质性的动态过程。总体上,无论对于 SOC 还是 STN 含量,在 0~5cm、5~10cm、10~20cm 3 个土壤层次中,随着灌丛斑块的发育,其内部含量的变化最强烈,外部次之,而边缘变化不大。随着灌丛斑块的发育,其不同位置各土壤层次 SOC 与 STN 含量增幅的共同特征是:在水平方向上,对于表层 0~5cm 土壤层次,由灌丛内部到边缘再到外部,SOC 与 STN 含量的变化是一致的;垂直方向上对于灌丛内部由表层 0~5cm 到 5~10cm 再到 10~20cm,SOC 与 STN 含量的变化也是一致的(表 3)。

表 3 从小灌丛组到大灌丛组 SOC 与 STN 的平均增幅(mg/g)
Table 3 Average increment in SOC and STN from small group to large group of shrubs

土壤层次 Soil layer(cm)	SOC 的增幅 Increment in SOC			STN 的增幅 Increment in STN		
	内部 Inside	边缘 Edge	外部 Outside	内部 Inside	边缘 Edge	外部 Outside
0~5	3.66**	0.24	-2.69**	0.30**	0.06	-0.28**
5~10	2.97*	-1.15	0.52	0.07*	0.02	-0.09
10~20	-0.57	0.89	-0.68	-0.01	-0.09	-0.06

**表示灌丛组间均值差异水平 Correlation is significant at 0.01 level $p<0.01$,*表示灌丛组间均值差异水平 Difference at 0.05 level $p<0.05$

在 0~5cm、5~10cm、10~20cm 3 个土壤层次中,表层 0~5cmSOC 与 STN 在灌丛斑块内部与外部的变化均最为强烈。随着灌丛斑块的发育,内部含量显著增加,而外部则显著降低,二者均达到统计上的显著程度。

2.4 随灌丛斑块发育灌丛自身对土壤碳、氮资源富集程度的动态

为明确随着灌丛斑块发育其引起的土壤碳、氮资源空间异质性的变化程度,以下将灌丛内部相对于外部的富集程度定义为:同一层次灌丛内部与灌丛外部 SOC(或 STN)的差值;将灌丛内部相对于边缘的富集程度定义为:同一层次灌丛内部与灌丛边缘 SOC(或 STN)的差值。

2.4.1 灌丛斑块内部相对于外部对土壤碳、氮资源富集程度的变化 无论对于 SOC 与 STN,在灌丛斑块发育的早期与晚期,灌丛内部相对于外部的富集均是存在的。随着灌丛斑块的发育,这种富集程度在 0~5cm、5~10cm、10~20cm 3 个土壤层次均表现明显增长趋势,并且均达到统计上的显著程度,其中表层 0~5cm 土壤富集程度的增长最快(表 4)。这表明随着退化草原灌丛化的进程,随着小叶锦鸡儿灌丛斑块的发育,它引起的灌丛内外土壤资源空间异质性不断增强。

表 4 灌丛斑块内部相对于外部对 SOC 与 STN 的富集程度(mg/g)
Table 4 Increment in SOC and STN of in-shrub relative to out-shrub

土壤层次 Soil layer(cm)	土壤有机碳 SOC			土壤全氮 STN		
	小灌丛组	大灌丛组	差异程度	小灌丛组	大灌丛组	差异程度
	Small group	Large group	p	Small group	Large group	p
0~5	7.22±2.66	13.56±2.18	<0.01	0.70±0.33	1.28±0.48	<0.01
5~10	7.99±3.18	10.44±3.03	<0.01	0.57±0.17	0.73±0.31	<0.01
10~20	4.28±1.68	4.39±1.87	<0.05	0.45±0.15	0.50±0.20	<0.05

2.4.2 灌丛斑块内部相对于边缘对土壤碳、氮资源的富集程度的变化 无论对于 SOC 与 STN,在灌丛斑块发育的早期与晚期,灌丛内部相对于边缘的富集均是存在的。随着灌丛斑块的发育,这种富集程度在 0~5cm、5~10cm、10~20cm 3 个土壤层次均明显增加,并且均达到统计上的显著程度,其中表层 0~5cm 土壤富集程度的增加最快(表 5)。这表明随着退化草原灌丛化的进程,随着小叶锦鸡儿灌丛斑块的扩展,灌丛对土壤碳、氮资源富集区域也在扩展,导致了土壤资源的空间异质性不断增强。

总之,灌丛斑块内部相对于其外部(或边缘)对于土壤碳、氮资源的富集程度,随着灌丛斑块自身发育均不断增强。这意味着退化草原灌丛化过程中,灌丛斑块自身的扩展与其引起的土壤资源空间异质性增强之间存在相互增强的正反馈过程,并且这种

正反馈过程在土壤 0~5cm 表层的表现最为明显。

表 5 灌丛斑块内部相对于边缘对 SOC 与 STN 的富集程度(mg/g)
Table 5 Increment in SOC and STN of in-shrub relative to edge-shrub

土壤层次 Soil layer(cm)	土壤有机碳 SOC			土壤全氮 STN		
	小灌丛组	大灌丛组	差异程度	小灌丛组	大灌丛组	差异程度
	Small group	Large group	<i>p</i>	Small group	Large group	<i>p</i>
0~5	4.28±2.89	7.70±3.93	<0.01	0.44±0.44	0.68±0.49	<0.01
5~10	3.81±4.01	6.54±3.46	<0.01	0.35±0.21	0.40±0.32	<0.01
10~20	1.22±1.50	1.55±1.68	<0.05	0.25±0.15	0.33±0.20	<0.05

2.5 随着灌丛斑块发育表层 0~5cm 土壤异质性变化的原因

以上结果表明:退化草原灌丛化过程中,随着小叶锦鸡儿灌丛斑块扩展,灌丛内部相对于外部与边缘对土壤资源的富集程度的变化均以表层 0~5cm 最为强烈。直接原因是随着灌丛斑块发育,灌丛内部土壤碳、氮资源含量显著增加,而灌丛外却不断下降的结果。

植物对于土壤异质性的形成有着决定性的影响。表层 0~5cmSOC 的空间异质性及其动态,首先与灌丛斑块自身的生物量生产、凋落与分解过程密切相关,也与小叶锦鸡儿灌丛对枯落物截留有关。

表 6 退化草原灌丛斑块内外植被的地上生物量
Table 6 Aerial biomass inside and outside of shrubs in the degraded grassland(g/m²)

地上生物量 Aerial biomass	内部 Inside		外部 Outside
	灌木层 Shrub	草本层 Herb	草本植被 Herbaceous vegetation
现存量 Standing biomass	170.37±62.70	100.84±55.42	88.16±13.10
凋落物量 Litter	193.26±67.75		20.31±6.42

依据灌丛化草原灌丛斑块内外植被 0.5m×0.5m 的样方调查结果:就草本植物现存生物量、凋落物量而言,灌丛内均明显高于灌丛外退化草地,且均有统计上显著性($p<0.01$)(表 6)。灌丛斑块内部有大量凋落物平均为 193.26±67.75 g/m²,目测判断主要为猪毛菜(*Salsola collina*)和糙隐子草的地上死枯体,估计不小于 159.25±63.30 g/m²,由于退化草地中猪毛菜与糙隐子草主要分布于灌丛外,因此灌丛内积累的大量凋落物由相当一部分来自灌丛外退化草地中的枯落物。这表明灌丛斑块引起土壤异质性的增强过程中,存在着灌丛外围退化草地凋落物向灌丛内部的转移,导致灌丛外凋落物的净损失与灌丛内部净增加。

以灌丛斑块大小为控制因素,对灌丛斑块内外的表层 0~5cmSOC 偏相关分析,对于小灌丛组与大灌丛组,其负相关系数分别为 0.9243、0.9888,且在统计上均具有显著意义(对于小、大灌丛组, $p<0.01$)。这表明随着灌丛斑块的发育,灌丛斑块内外土壤表层 SOC 含量之间存在负相关关系,枯落物大量转移导致了灌丛内外 SOC 含量差异。

因此,随着灌丛斑块扩展其截留枯落物的能力增强,很自然这种枯落物大量转移引起灌丛外部退化草地中表层 0~5cm 土壤 SOC 下降、相应地灌丛内部表层 SOC 含量增加,导致土壤有机碳空间异质性的分布。

3 讨论

在内蒙古半干旱草原灌丛化过程中,小叶锦鸡儿灌丛斑块引起了土壤有机碳与全氮含量的空间异质性,并且这种空间异质性随着灌丛斑块发育而趋于增强,而表层 0~5cm 土壤空间异质性增强趋势强烈。表层土壤空间异质性的增强形成与灌丛自身凋落物的生产以及对凋落物的截留有关。草原灌丛化过程中,土壤碳、氮资源空间异质性增强的涉及到土壤资源在空间的重新分布。资源重新分布有两种方式:一是单位面积总体的养分、微生物和生物量未变^[11],这也是 Bolton 等^[23]在对半干旱环境中草原和灌木地比较中发现的。换言之,一部分资源通过径流(runoff)或侵蚀丧失,但同时这部分(remaining)资源却向沃岛集中,因而改变了资源分布并促进灌木发育;另外一种方式是通过碳、氮资源净流失,导致较低养分密度和微生物多度与活动,因而该地点的生物学潜能(biological potential)可能减弱或彻底丧失^[17,24]。这两种方式都导致土壤资源空间异质性增强。在我国内蒙古半干旱草原灌丛化的过程中,土壤有机碳与全氮含量空间异质性的增强也是其在空间重新分布的结果,而其中灌丛外地上凋落物向灌丛下的转移是导致土壤资源空间重新分布的一种重要生态学过程。

草原灌丛化过程中灌丛斑块表层土壤资源空间异质性的显著增强说明:退化草原灌丛化过程中,小叶锦鸡儿引起的土壤资源空间异质性的变化是一个自我增强的过程,灌丛斑块扩展与其土壤异质性的增强之间存在着正反馈作用,这种正反馈作用促进了内蒙古半干旱草原灌丛化过程。Schlesinger 等^[14,17]证实了荒漠灌木向半干旱草原入侵是与灌木下“沃岛”的发育相关联的。半干旱草原长期放牧导致水分、氮素和其它土壤资源时间、空间异质性增强,土壤资源的异质性促使荒漠灌木入侵,这导致土壤资源在灌木冠层下进一步局部富集。养分在灌木下积累是一个自发(auto-genic)过程并可能促进了群落灌木的维持和被灌

木入侵的草原的荒漠化^[18];同时,当这些灌木沃岛形成,它们更可能具有对环境扰动抵抗力和在群落中更持久的维持能力^[15,18]。显然,更深入的研究草原灌丛化过程中土壤异质性形成过程,将有助于认识我国内蒙古灌丛化草原结构与功能,实现灌丛化草原放牧系统的可持续利用。

References:

- [1] Archer S, Boutton T W & Hibbard K A. Trees in grasslands: biogeochemical consequences of woody plant expansion. In: Schulze E, Heimann M, Harrison S, *et al.* eds. *Global biogeochemical cycles in the climate system*. A Harcourt Science and Technology Company, California USA, 2001. 115~138.
- [2] Zhang H, Shi P J & Zheng Q H. Research progress in relationship between shrub invasion and soil heterogeneity in a natural semi-arid grassland. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(3): 366~370.
- [3] Xiong X G, Han X G, Chen Q S, *et al.*. Increased abundance of woody plants in grasslands and savannas. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(11): 2436~2443.
- [4] Xiong X G, Han X G, Pan Q M. Increased distribution of *Caragana microphylla* in rangelands in Xi-Lin River Basin and its causes and consequences. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, **12**(3): 57~62.
- [5] Gibson D J. Spatial and temporal heterogeneity in soil heterogeneity in dune grassland. *Journal of Ecology*, 1988, **76**: 497~508.
- [6] Fitter A H. Architecture and biomass allocation as components of the plastic response of root systems to soil heterogeneity. In: Caldwell M M & Pearcy R W eds. *Exploitation of environmental heterogeneity by plants*. Academic Press, San Diego, Calif., 1994. 305~323.
- [7] Stark J M. Causes of soil nutrient heterogeneity at different scales. In: Caldwell M M and Pearcy R W eds. *Exploitation of environmental heterogeneity by plants*. San Diego, Calif: Academic Press, 1994. 255~284.
- [8] Whitford W G, J Anderson & P M Rice. Stem-flow contribution to the "fertile island" effect in creosotebush, *Larrea tridentate*. *Journal of Arid Environment*, 1997, **35**: 451~457.
- [9] Binkley D & Giardina C. Who do tree species affect soils? The warp and woof of tree-soil interactions. *Biogeochemistry*, 1998, **1-2**: 89~106.
- [10] Schlesinger W H & Pilmanis A M. Plant-soil interactions in deserts. *Biogeochemistry*, 1998, **1-2**: 169~187.
- [11] Kieft T L, White C S, Loftin S R, *et al.* Temporal dynamics in soil carbon and nitrogen resources at a grassland-shrubland ecotone. *Ecology*, 1998, **79**(2): 671~683.
- [12] Charley J L & West N E. Plant-induced soil chemical patterns in some shrub-dominated semi-desert ecosystems of Utah. *Journal of Ecology*, 1975, **63**: 945~964.
- [13] Virginia R A & Jarrell W M. Soil properties in a mesquite-dominated Sonoran desert ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, **47**: 138~144.
- [14] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, *et al.* On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 1996, **77**: 364~374.
- [15] Grover H K & Musick H B. Shrubland encroachment in southern New Mexico, U. S. A: an analysis of desertification processes in the American Southwest. *Climatic Change*, 1990, **17**: 305~330.
- [16] Grime J P. The role of plasticity in exploiting environmental heterogeneity. In: Caldwell M M & Pearcy R W eds. *Exploitation of environmental heterogeneity by plants*. San Diego, Calif: Academic Press, 1994. 1~9.
- [17] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, *et al.* Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 1990, **247**: 1043~1048.
- [18] Reynolds J F, Virginia R A, Kemp P R, *et al.* Impact of drought on desert shrubs: effects of seasonality and degree of Resource Island development. *Ecological Monographs*, 1999, **69**(1): 69~106.
- [19] Westoby M, Walker B & Noy-Meir I. Opportunistic management for rangelands not at equilibrium. *Journal of Range Management*, 1989, **42**: 266~274.
- [20] Laycock W A. Stable states and thresholds of range condition in North American rangelands: a viewpoint. *Journal of Range Management*, 1991, **44**: 427~433.
- [21] Xiong X G, Han X G, Chen Q S. Fertile island effects in arid and semi-arid ecosystems. In: Li C S, chief editor. *Advances in plant sciences* (Vol. 5). Beijing: Higher Education Press, 2003. 179~183.
- [22] Hibbard K A, Archer S, Schimel D S, *et al.* Biogeochemical changes accompanying woody plant encroachment in a subtropical savanna. *Ecology*, 2001, **82**: 1999~2011.
- [23] Bolton H, Smith J L & Link S O. Soil microbial biomass and activity of a disturbed and undisturbed shrub-steppe ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, **25**: 545~525.
- [24] Whitford W G. Desertification: implications and limitations of the ecosystem health metaphor. In: Rapport D J, Gaudet C L & Calow P eds. *Evaluating and monitoring the health of large-scale ecosystems*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1995. 273~293.

参考文献:

- [2] 张宏,史培军,郑秋红. 半干旱地区草地灌丛化与土壤异质性关系研究进展. *植物生态学报*, 2001, **25**(3): 366~370.
- [3] 熊小刚,韩兴国,陈全胜,等. 木本植物多度在草原和稀树干草原中增加的研究进展. *生态学报*, 2003, **23**(11): 2436~2443.
- [4] 熊小刚,韩兴国,潘庆民. 锡林河流域草原中小叶锦鸡儿分布增加的趋势、原因和结局. *草业学报*, 2003, **12**(3): 67~62.
- [21] 熊小刚,韩兴国,陈全胜. 干旱和半干旱生态系统中的沃岛效应. *植物科学进展*(5),李承森(主编). 北京:高等教育出版社, 2003. 179~183.